



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JUKKA VÄLJÄ

VOIMAJOHTOJEN INDUKTIOVAARAJÄNNITTEET

Diplomityö

Tarkastajat: dosentti Kari Kannus,  
tekniikan tohtori Kari Lahti  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 8. joulukuu-  
ta 2010

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**VÄLJÄ, JUKKA:** Voimajohtojen induktiovaarajännitteet

Diplomityö, 72 sivua, 5 liitesivua

Toukokuu 2011

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: dosentti Kari Kannus, tekniikan tohtori Kari Lahti

Avainsanat: Induktio, vaarajännite, voimajohto, reduktiovaikutus

Voimajohtojen aiheuttamat vaarajännitteet kytkeytyvät kolmella tavalla: induktiivisesti, kapasitiivisesti ja johtumalla. Tämä työ käsittelee induktiivista kytkeytymistä, joka on näistä tietyllä tapaa yleisin ja vaikuttaa laajimmalla alueella. Induktiiviset vaarajännitteet aiheutuvat sähkövirran muodostaman magneettikentän välityksellä. Induktiivista kytkeytymistä voimajohdon kanssa yhdensuuntaisiin johtaviin rakenteisiin tapahtuu voimajohtojen normaalitilan aikana, mutta suurimmat vaikutukset syntyvät 1-vaiheisessa maasulussa. Suomen maan huonosta ominaisresistiivisyydestä johtuen maasulkuvirta palaa syöttävälle asemalle noin 4470 metrin syvyydessä muodostaen hyvin laajan indusoivan virtasilmukan, jonka induktiovaikutus ulottuu jopa 10–15 km päähän.

Standardin SFS-EN 50341 mukaan voimajohdot eivät saa aiheuttaa haitallisia tai vain häiritseviä induktiovaikutuksia. Raja-arvot Suomessa sallituille indusoituville jännitteille annetaan Viestintäviraston määräyksessä 43D/2010M. Indusoituva sähkömotorinen voima saadaan maasulkutilanteessa laskettua maasulkuvirran ja keskinäisimpedanssin tulona. Keskinäisimpedanssi on voimajohdon ja kohteen välisestä etäisyydestä, virran taajuudesta ja maan ominaisresistiivisyydestä riippuva termi. Indusoituvan smv:n laskennassa voidaan ottaa huomioon indusoituvaa smv:tä pienentävä reduktiovaikutus, jota aiheutuu lähinnä ukkosjohtimista. Reduktiolla tarkoitetaan maasulkuvirran jakautumista ukkosjohtimien ja maan välille. Reduktiota aiheuttavat myös taajamien metalliset putkistot, kaapeleiden metalliset vaipat sekä rautatiekiskot. Reduktion hyödyntäminen on erittäin tärkeää haluttaessa rajoittaa indusoituvaa smv:tä.

Indusoituvat jännitteet muodostavat ongelmia lähinnä televerkossa ja metallisissa maakaasun siirtoputkissa. Telejohdoista ongelmallisia ovat kupariset johtimet. Valokaapeliin indusoituvat jännitteet eivät aiheuta ongelmia lukuun ottamatta metallista suojavaippaa. Indusoituvat jännitteet saattavat aiheuttaa hengenvaaran jännitteiseen laitteistoon koskevalle henkilölle. Ne voivat myös rikkoa laitteita ja aiheuttaa häiriöitä. Maakaasuputkien kannalta ongelmana on sen korroosio ja putken katodinen suojausjärjestelmä, jonka toiminta saattaa induktion johdosta häiriintyä.

Induktiivisilta jännitteiltä voidaan suojautua muutamilla keinoilla. Suunnitteluvaiheessa tele- ja voimajohdon väliseen etäisyyteen tulee kiinnittää huomiota. Voimajohdon ukkosjohtimien valinnalla saadaan hyödynnettyä reduktiota. Myös erilaisia reduktiota hyödyntäviä laitteita voidaan käyttää. Nykyään yleisin ja käytännössä paras tapa on kuitenkin käyttää ylijännitesuojia ja riittävää maadoitusta.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**VÄLJÄ, JUKKA:** Induced Hazard Voltages by Power Lines

Master of Science Thesis, 72 pages, 5 Appendix pages

May 2011

Major: Power Systems and Electricity Market

Examiner: Docent Kari Kannus, Doctor of Science Kari Lahti

Keywords: Induction, hazard voltages, power line, screening effect

Power lines cause three kinds of hazard voltages: inductive, capacitive and conductive. This thesis is about inductive coupling which is the most usual and which affects a very large area. The inductive interference on conductive structures running parallel to the power line is occurred by the magnetic field generated by the power line during the normal load conditions and the single-phase earth faults. The single-phase earth fault is the most severe situation. Finland has a very high earth resistivity which forces the earth current to flow approximately at the depth of 4470 meters. This current forms a large induction loop which induces electromotive forces to even 10–15 kilometres away.

The standard SFS-EN 50341 requires that power lines should not cause dangerous or simply annoying induction effects. Limits for the induced voltages in Finland are given in the Finnish Communications Regulatory Authority regulation 43D/2010M. Induced electromotive forces in earth faults can be calculated as the product of earth fault current and mutual impedance. Mutual impedance depends on the distance between power line and induced construction, frequency of the inducing current and the earth resistivity. The screening action which will reduce the inducing current and electromotive force can be taken into account. The screening action is mainly caused by the power line overhead ground wires. The screening effect is a phenomenon where the earth fault current will be divided into the overhead ground wires and earth. The screening action is also caused due to the buried metallic pipelines and other metallic structures in urban areas. Screen layers of cables and railway rails also cause screening effect. The utilization of screening effect is very important in limiting induced voltages.

Induced voltages cause problems mainly in telecommunication networks and metallic natural gas pipelines. In the telecommunication network the most problematic cables are the copper ones. Optical cables do not constitute a problem unless the cable has a conducting screen layer. Inducing voltages can cause damage to different apparatus or danger to people touching influenced apparatus. They can also cause interference to the telecommunication system. The problem with natural gas pipelines is their cathodic protection system which can be interfered due to the induction.

There are a couple of means to protect oneself from the inductive coupling. In the design phase special attention should be paid to the distance between the telecommunication and power lines. The screening action can be utilized by choosing the appropriate overhead ground wires. Different kinds of apparatus can also be used. In practice the most common and the best way is to use surge arresters and adequate earthing.

## ALKUSANAT

Tämä on ELTEL Networks Oy:lle tekemäni diplomityö. Työskenneltyäni yrityksessä voimajohtoasentajana kesät 2008 ja 2009 sekä suunnittelijana vuonna 2010 yritys tarjosi minulle viime syksynä mahdollisuuden diplomityön tekemiseen. Työn ohjaajana on yrityksestä toiminut suunnittelupäällikkö Jarmo Kuusinen. Oman kontribuutionsa työlle ovat antaneet myös Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n edustajat Keijo Välimaa ja Ulla Huhtanen, joilta olen saanut neuvoja ja apua tarvittaessa. Tampereen teknillisen yliopiston puolelta työn tarkastajina ovat toimineet Kari Kannus ja Kari Lahti. Kiitos kaikille, jotka ovat minua diplomityössäni tukeneet.

Työ on ollut todella antoisa monestakin syystä. Olen saanut tutustua mielenkiintoiisiin henkilöihin, joiden tuntemisella toivon tulevaisuudessa olevan käyttöarvoa. Lisäksi olen saanut käsiini hyvin arvokasta lähdemateriaalia, jonka avulla olen voinut sivistää itseäni. Tämän työn suurin anti lieneekin juuri oman asiantuntijuuteni lisääntyminen voimajohtojen vaarajännitteisiin ja vikatilanteisiin liittyvissä sähköisissä ilmiöissä.

Tampereella 20.5.2011

Jukka Väljä

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Sähkövoimaverkon rakenne Suomessa .....	2
2.1	Maaperän resistiivisyys ja voimajohtojen maadoitukset.....	3
2.2	Vikatyypit ja -virrat.....	5
2.2.1	Maasulkuvirta .....	7
3	Induktio .....	11
3.1	Induktion teoria .....	11
3.2	Voimajohdon indusoimat smv:t .....	11
3.2.1	Normaalikäytössä indusoituva smv .....	12
3.2.2	Vikatilanteessa indusoituva smv.....	13
3.3	HVDC .....	19
4	Reduktiovaikutus .....	21
4.1	Voimajohdon reduktio .....	21
4.1.1	Ukkosjohtimet.....	21
4.1.2	Suurjännitekaapeli .....	26
4.2	Muut reduktiota aiheuttavat tekijät .....	27
4.2.1	Taajama.....	27
4.2.2	Rautatiekiskot .....	28
4.2.3	Reduktiojohdin.....	28
4.2.4	Telekaapeli ja sen lähellä kulkevat muut telejohdot.....	29
5	Vaarajännitekohteet.....	30
5.1	Televerkko.....	30
5.1.1	Rakenne ennen, nyt ja tulevaisuudessa.....	30
5.1.2	Maadoittaminen ja suojaaminen .....	33
5.1.3	Käytettävät johtimet.....	34
5.1.4	Televerkkoon indusoituvat jännitteet.....	35
5.1.5	Vaikutukset .....	40
5.2	Maakaasuputket.....	41
5.2.1	Suomen maakaasuverkosto.....	41
5.2.2	Maakaasuputkistoon indusoituvat jännitteet.....	42
5.2.3	Vaikutukset .....	43
5.3	Rinnakkaiset voimajohdot.....	44
5.4	Muut johtavat rakenteet voimajohtojen lähetyvillä .....	44
6	Vaarajännitteiden ennalta ehkäisy ja niiltä suojautuminen.....	46
6.1	Suojausratkaisuja.....	47
6.2	Työturvallisuus.....	54
7	Direktiivit, standardit, ohjeet ja määräykset .....	56
7.1	SFS-EN 50341-1, SFS-EN 50341-3-7 ja SFS 6001 .....	56
7.2	SFS 5717 .....	57
7.3	Määräys viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta.....	58

7.4	ITU-direktiivit .....	59
7.5	VHV-ohjeet .....	60
7.6	ITU-T K.68 .....	60
7.7	Eri osapuolten välisistä suhteista .....	60
8	Induktiovaarajänniteselvitys .....	62
8.1	Selvitystyön eteneminen .....	62
9	Johtopäätökset .....	66
	Lähteet .....	69
	Liite 1: Maan ominaisresistiivisyys	
	Liite 2: Pysyvyyskäyrät Suomen yksivaiheisista maasulkuvirroista	
	Liite 3: Pylvästyyppejä	
	Liite 4: Suomen kaasunsiirtoverkko	

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

ac	Vaihtovirta
Alueverkko	Alueverkko on jakelu- ja alueverkkoyhtiöiden omistama suurjännitteinen 123–420 kV sähköverkko
CCITT	ITU:n osaston ITU-T nimi vuosina 1956–1993
dc	Tasavirta
Ekvivalenttinen resistiivisyys	Maaperän resistiivisyysarvo, joka koostuu useammasta eri resistiivisyysarvon omaavasta maalajikerroksesta
feral	Hyvin johtava teräs-alumiini-ukkosjohdin
HVDC	Lyhenne sanoista high voltage direct current. Suurjännitteistä tehonsiirtoa tasavirralla.
ITU	Lyhenne sanoista International Telecommunication Union.
ITU-T	ITU:n osasto, joka tuottaa standardeja.
Kantaverkko	Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n omistama ja hallitsema 123–420 kV sähköverkko
Keskijänniteverkko	Jakeluverkkoyhtiön omistama 1–70 kV sähköverkko
Kosketusjännite	Maadoitusjännitteen se osa, joka on kosketeltavissa
Maasulkukerroin	Maasulun aikaisen terveen vaiheen vaihejännitteen suhde normaaliin vaihejännitteeseen. Tehollisesti maadoitetussa verkossa $< 1,4$ .
Maadoitusjännite	Vikapaikan tai maadoituselektrodin potentiaalin ja kaukaisen neutraalin maan potentiaaliero
PCM	Lyhenne sanoista pulse-code modulation
PE-muovi	Polyeteeni, jota käytetään sähköisenä eristeenä esimerkiksi kaapeleissa
Pienjänniteverkko	Jakeluverkkoyhtiön omistama alle 1 kV sähköverkko
Resultoiva reduktiokerroin	Vikapaikasta näkyvä reduktiokerroin, joka muodostuu kahdesta eri reduktiokertoimesta, kun ukkosjohtimet vaihtuvat tietyllä etäisyydellä vikapaikasta
Siirtoverkko	Suurjännitteinen 123–420 kV sähköverkko. Tähän kuuluu sekä kantaverkko että alueverkot.
smv	Sähkömotorinen voima, jonka yksikkö on voltti. Kuvaa indusoituneen jännitteen voimakkuutta.
VHV	Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, joka on julkaissut vaara-jännitteisiin liittyen ohjeet 1–5

$\alpha$	Virran taajuudesta ja maan ominaisresistiivisyydestä riippuva kerroin
$\gamma$	Vakio, joka kolmen desimaalin tarkkuudella on 1,781. Vakio saadaan korottamalla Neperin luku potenssiin Eulerin vakio.
$\mu$	KytKentäkerroin ukkos- ja vaihejohtimien välillä
$\mu_0$	Tyhjiön permeabiliteetti, vakio $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
$\mu_r$	Suhteellinen permeabiliteetti
$\rho$	Maan ominaisresistiivisyys
$\rho_u$	Ukkosjohtimen resistiivisyys
$\omega$	kulmataajuus
$3I_0$	1-vaiheinen maasulkuvirta
$3I_{0eq}$	Ekvivalenttinen laskennallinen maasulkuvirta, kun maasulkuvirran suuruus muuttuu erilaisista laukaisuaajoista johtuen
$a$	Voimajohdon ja induktion kohteen välinen etäisyys
$A$	Ukkosjohtimen poikkipinta-ala
$b$	Ukkosjohtimien geometrinen keskietäisyys vaihejohtimista
$b_{xy}$	Vaihejohtimen etäisyys ukkosjohtimesta. Alaindeksillä merkitään, mitkä johtimet ovat kyseessä.
$c$	Ukkosjohtimien geometrinen keskietäisyys toisistaan
$c_{xy}$	Ukkosjohtimien etäisyys toisistaan. Alaindeksillä merkitään, mitkä johtimet ovat kyseessä.
$E$	Indusoituva sähkömotorinen voima, lähdejännite
$f$	Taajuus
$h$	Maavirran laskennallinen kulkusyvyyys
$I$	Kuormitusvirta
$I_0$	Symmetrisistä komponenteista nollaverkon virta
$I_1$	Symmetrisistä komponenteista myötäverkon virta
$I_2$	Symmetrisistä komponenteista vastaverkon virta
$I_f$	Vikavirta
$I_e$	Maasulkuvirran se osa, joka palaa syöttävälle asemalle maassa kulkien (siirtyy maahan vikapylväältä sekä ukkosjohtimien välityksellä vikapylvään läheisiltä pylväiltä)
$I_t$	Sähkömotorisen voiman aikaansaama virta telejohdossa
$I_{ui}$	Maasulkuvirran ukkosjohtimiin indusoima virta eli maasulkuvirran se osa, joka palaa syöttävälle asemalle ukkosjohtimia pitkin
$k$	Kokonaisreduktiokerroin, joka on yksittäisten reduktiokerroimien tulo
$k_r$	Sähköradan läheisyydestä johtuva reduktiokerroin
$k_s$	Ukkosjohtimista aiheutuva reduktiokerroin



$k_t$	Telekaapelin reduktiokerroin
$k_y$	Ympäristön johtavista rakenteista johtuva reduktiokerroin
$ker', kei'$	Kelvinin funktioita
$l$	Voima- ja telejohdon tai muun johtavan rakenteen yhden-suuntaisen osuuden pituus
$L_{dc}$	HVDC-järjestelmän dc-puolen kokonaisinduktanssi
$L_m$	Keskinäisinduktanssi
$m$	Maksimiprojektio
$n$	Ukkosjohtimien lukumäärä
$r$	Maavirran $I_e$ puoliympyrän mallisen poikkipinta-alan säde
$r_u$	Ukkosjohtimen säde
$r_e$	Ukkosjohtimien muodostaman ”nipun” ekvivalenttisäde
$r_1, r_2, r_3$	Voimajohdon vaihejohtimien 1, 2, 3 etäisyys telejohdosta
$R_m$	Maavirran $I_e$ maassa kohtaama resistanssi (Suomessa noin 50 mΩ/km)
$R_p$	Pylvään maadoitusresistanssi
$R_u$	Rinnankytkettyjen ukkosjohtimien resistanssi
$t$	aika
$u_c$	Konvertterin jännitteen hetkellisarvo
$U_1, U_2$	Maadoitusjännite
$U_{dc}$	HVDC käyttöjännite
$U_y$	Ylijännitesuojan jäännösjännite
$Z_m$	Keskinäisimpedanssi
$Z_t$	Telejohdon impedanssi
$Z_u$	Ukkosjohtimien maapaluuimpedanssi
$x$	Voimajohdon ja indusoituvan kohteen välisen etäisyyden $a$ ja kertoimen $\alpha$ tulo. Tämän funktiona voidaan keskinäisimpedanssi ilmoittaa riippumatta käytettävästä järjestelmästä ja maan ominaisresistiivisyydestä.
$X_m$	Ukkos- ja vaihejohtimen välinen keskinäisreaktanssi
$X_u$	Ukkosjohdin-maa-piirin reaktanssi

# 1 JOHDANTO

Vaarajännitteiksi nimitetään sellaisia voimajohtojen aiheuttamia ylijännitteitä, jotka voivat aiheuttaa laitteille vaurioita tai ihmiselle vaaraa. Voimajohtojen aiheuttamat vaarajännitteet aiheutuvat konduktiivisesta, kapasitiivisesta ja induktiivisesta kytkeytymisestä. Konduktiivisella kytkeytymisellä tarkoitetaan voimajohdon jännitteisen osan suoraan tai johtumalla siirtyvää välillistä kosketusta tarkasteltavaan rakenteeseen. Tällä voidaan tarkoittaa esimerkiksi pylvällä tapahtuvassa maasulussa maadoitusjännitteen kautta muodostuvaa kosketusjännitettä. Maan potentiaalientästä vaarallinen jännite voi edelleen siirtyä esimerkiksi telejohtoon sen maadoitusten kautta.

Kapasitiivisia jännitteitä syntyy voimajohdon vierellä kulkevaan johtavaan rakenteeseen näiden välisen kapasitanssin kautta. Näin muodostuva jännite saattaa olla hyvinkin suuri, mutta sen teho on hyvin pieni. Kapasitiiviset jännitteet ovat ongelmana vain teleavojohdoilla ja metallisuojuksettomilla ilmakaapeleilla tai muilla paljailla eristämättömillä rakenteilla. [1] Myöskään maan alla kulkeviin rakenteisiin tämä ei vaikuta. Kapasitiivisesti muodostuvan jännitteen suuruus riippuu pääasiassa voimajohdon jännitteestä sekä sen etäisyydestä johtavaan rakenteeseen. Myös voimajohdon käyttötila, esimerkiksi vikatilanne, vaikuttaa syntyvään jännitteeseen. [2]

Tämä työ keskittyy induktiivisen kytkennän kautta muodostuviin vaarajännitteisiin. Esiintymistiheyteen verrattuna se on kolmesta kytkeytymistavasta yleisin [3]. Voimajohdossa kulkeva virta synnyttää ympärilleen magneettikentän. Tämä magneettikenttä indusoi jännitteitä läheisiin johtaviin rakenteisiin niin normaalikäytön kuin vikatilanteidenkin aikana. Suurin vaikutus tehollisesti maadoitetussa sähköverkossa syntyy voimajohdon 1-vaiheisesta maasulusta. Maasta erotetussa verkossa induktio aiheuttaa haitallisia induktiovaikutuksia vähemmän, koska maasulkuvirrat ovat pieniä. Tässä työssä valaistetaan ilmiötä ja siihen vaikuttavia seikkoja sekä esitetään menetelmiä, joilla ilmiön voimakkuutta voidaan pienentää.

Työ etenee aluksi kertomalla sähkövoimaverkon rakenteesta, sen maadoituksista ja mahdollisista vikatilanteista. Tämän jälkeen esitellään induktiota ilmiönä ja esitetään, millä tavoin se vaikuttaa voimajohdon tapauksessa. Myös reduktioilmiötä selitetään ja kerrotaan, kuinka sitä voidaan indusoiduissa jännitteissä hyödyntää.

Indusoidut jännitteet ovat lähinnä televerkkojen ja maakaasuputkien kannalta ongelmallisia, joten näiden järjestelmien rakenteesta kerrotaan myös. Lopussa käsitellään aiheeseen liittyviä määräyksiä ja niiden pohjalta tehtävää induktiovaarajänniteselvitystä. Induktiovaarajänniteselvitys-kappale on kirjoitettu yhteenvetomaisesti luvuista 2–9 sekä kirjoittajan omiin kokemuksiin pohjautuen.

## 2 SÄHKÖVOIMAVERKON RAKENNE SUOMESSA

Suomen sähköjärjestelmä koostuu karkeasti tuotantolaitoksista, kantaverkosta, alueverkoista, keskijänniteverkosta, pienjänniteverkosta sekä eri jänniteportaiden välissä olevista sähköasemista ja muuntamoista. Perinteisesti sähkö tuotetaan suurissa keskitetyissä tuotantolaitoksissa, joista se siirretään valtakunnan kantaverkkoon häviöiden minimoimiseksi tyypillisesti 123–420 kV jännitteellä. Sähköverkossa syntyvät häviöt ovat verrannollisia kuormitusvirran neliöön, joten suurten tehojen siirtämiseen on kannattavaa nostaa käytettävää jännitettä. Korkeilla jännitteillä käytettävät johtimet ovat myös tyypillisesti poikkipinnaltaan suurempia kuin pienemmillä jännitteillä käytettävät, jolloin niiden impedanssi on myös pienempi. Tästä syystä niitä voidaan kuormittaa suuremmilla virroilla. Esimerkiksi yleisesti 420 kV johdoilla käytetyllä Finch-johtimella ohjekuormitettavuus on 1250 A [4].

Kuormitusvirrat vaihtelevat johdoilla jatkuvasti, mutta esimerkiksi voimalaitosten liityntäjohdoilla ne ovat vakaammat, riippuen kuitenkin voimalaitoksen ajoista. Kantaverkon johdoilla ei voida siirtää tehoa johdon maksimiteholla koko aikaa, koska silmukoidun verkon mitoitusperiaate on se, että yhden johdon vikaantuessa ja pois kytkettäessä muut johdot eivät saa ylikuormittua. Myös suuret häviökustannukset rajoittavat käyttöä pienemmille virroille. Tarvittaessa johtoja käytetään mitoitusvirroilla, joiden arvot riippuvat muun muassa mitoitus- ja ympäristölämpötiloista. Tyypillisiä mitoitusarvoja ovat olleet:

- Finch-johdin      750 A...950 A
- Duck-johdin      655 A
- Hawk-johdin      460 A...580 A

Normaalisti suurimmat kuormitusvirrat ovat 420 kV johdoilla reilusti alle 2000 A, 245 kV johdoilla 500 A ja 123 kV johdoilla vähän yli 1000 A. [5]

Suomen 123–420 kV sähköverkon, eli siirtoverkon, omistus ja hallinta jakaantuu kolmelle sektorille. Suurin osa siirtoverkosta kuuluu kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:lle. Tätä osaa kutsutaan kantaverkoksi. Lopun siirtoverkon omistus ja hallinta jakautuu paikallisille sähköverkkoyhtiöille ja erillisille alueverkkoyhtiöille. Yhteensä Suomessa on noin 22 400 kilometriä 123–420 kV voimajohtoja. Osa näistä kulkee samoilla useamman virtapiirin yhteispylväillä. [6]

Paikalliset sähköverkkoyhtiöt hallinnoivat myös 1–70 kV keskijännite- ja alle 1 kV pienjänniteverkkoa. Näiden verkkojen pituudet ovat kertaluokkaa suuremmat kuin siirtoverkkojen. Suomen sähköverkon pituudet ovat eriteltynä taulukkoon 2.1.

**Taulukko 2.1.** Suomen sähköverkon pituus kilometreinä jänniteportaittain vuoden 2009 lopussa.[6]

	123 kV	245 kV	420 kV	Keskijännite-verkko	Pienjännite-verkko
<b>Fingrid</b>	7 493	2 482	4 263		
<b>Jakeluverkkoyhtiöt</b>	6 404			137 019	233 393
<b>Alueverkkoyhtiöt</b>	1 716		37		

Verkoston rakenne vaihtelee eri jännitetasoilla. Keskijänniteverkko on tyypillisesti rakennettu rengasmaiseksi, mutta sitä käytetään muun muassa suojauksen yksinkertaistamiseksi säteittäisenä. Rengasrakenne mahdollistaa kytkentätilaa muuttamalla tehonsyötön vaihtoehtoista reittiä esimerkiksi vikatilanteessa, jolloin vika saadaan tarkemmin rajattua. Kantaverkko puolestaan on rakennettu silmukoiduksi. Silmukoitu verkko koostuu rengasverkoista, jotka sisältävät myös renkaiden sisäisiä väliyhteyksiä. Silmukoidun ja rengasverkon hyviä puolia ovat varmistettu syöttö, parempi jännitejäykkyys sekä pienemmät tehohäviöt. Toisaalta suojaus on monimutkaisempi vikavirran monista syöttösuunnista johtuen. [7][4]

## 2.1 Maaperän resistiivisyys ja voimajohtojen maadoitukset

Maaperän resistiivisyyteen vaikuttavia seikkoja on useita. Näitä ovat maalajin tyyppi, raekoko, tiheys, kosteus, suolojen määrä sekä lämpötila. Maan resistiivisyys kasvaa tasaisesti, kun lämpötila laskee 25 °C:sta 0 °C:seen. Alle 0 °C mentäessä resistiivisyys lisääntyy nopeasti veden jäätyksen johdosta. Talvisin jäätyneen maanpinnan resistiivisyys voi saada poikkeuksellisen suuria arvoja. Suolojen ja kosteuden lisääntyessä resistiivisyys pienenee. Homogeenisten maaperätyyppien keskimääräisiä ominaisresistiivisyysarvoja on lueteltu taulukkoon 2.2. Todellisuudessa maaperän resistiivisyys ei kuitenkaan ole näin yksiselitteinen, sillä maa koostuu usein vähintään kahdesta eri resistiivisyyden omaavasta maalajikerroksesta. Ekvivalenttista maaperän resistiivisyyttä määrittäessä on kerrosten erilaiset resistiivisyydet otettava huomioon. [8][9] Liitteessä 1 on kuva lähteestä [10], jonka avulla voidaan arvioida ekvivalenttista maaperän resistiivisyyttä kaksikerroksisessa maaperässä.

**Taulukko 2.2. Maa-aineiden resistiivisyysarvoja. [8]**

Aine	Keskimääräinen ominaisresistiivisyys [ $\Omega\text{m}$ ]	Tavallisimmat vaihteluvälit [ $\Omega\text{m}$ ]
Savi	40	25...70
Saven sekainen hiekka	100	40...300
Lieju, turve, multa	150	50...250
Hiekka, hietta	2 000	1 000...3 000
Moreenisora	3 000	1 000...10 000
Harjusora	15 000	3 000...30 000
Graniittikallio	20 000	10 000...50 000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50...500
Betoni kuivana	10 000	2 000...100 000
Järvi- ja jokivesi	250	100...400
Pohja-, kaivo- ja lähdevesi	50	10...150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1...5

Suomen maaperä on lähellä maanpintaa olevasta kalliosta johtuen hyvin huonosti johtavaa. Lisäksi Suomessa kallion päällä oleva kerros on tyypillisesti moreenia. Suomessa yleisesti käytetty ja keskimääräinen maan ominaisresistiivisyyden arvo on 2300  $\Omega\text{m}$ , kun se taas Keski-Euroopassa voi olla vain 50  $\Omega\text{m}$ . Tämä asettaa Suomen hyvin erilaiseen asemaan sähköverkon maadoitustavan sekä myös indusoituvien jännitteiden kannalta. [11]

Käytännössä sähköverkon maadoitusvaihtoehtoja on kolme: suoraan maadoitettu, maasta erotettu ja sammutettu verkko. Suoraan maadoitetussa verkossa verkon tähtipisteet on maadoitettu suoraan tai pienen kuristimen kautta. Tällaisella maadoitustavan valinnalla halutaan pienentää maasulun aikana terveiden vaiheiden jännitteennousua ja samalla nopeuttaa suojauksen toimintaa suurien maasulkuvirtojen avulla. Kuristimen avulla maasulkuvirtaa saadaan hiukan pienennettyä, mutta verrattuna sammutettuun ja maasta erotettuun verkkoon maasulkuvirrat voivat olla hyvinkin suuria. [7]

Maasta erotetussa verkossa puolestaan verkon tähtipisteitä ei ole lainkaan maadoitettu. Vikatilanteessa maasulkuvirta kulkee mahdollisen vikaresistanssin kautta maahan ja sieltä edelleen johtojen maakapasitanssien kautta takaisin vaihejohtimiin. Vaihejohtimissa virta kulkee johdinten impedanssien kautta muuntajan käämityksiin, josta se jälleen palaa viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan. Johdinten ja muuntajakäämien impedanssien ollessa hyvin pieniä verrattuna maakapasitansseihin voidaan ne olettaa nolliksi, jolloin vikavirta on kapasitiivista. Maasulkuvirran suuruus riippuu päämuuntajan jälkeisen galvaanisesti yhtenäisen verkon laajuudesta, mutta jää pääsääntöisesti hyvin pieneksi. Maasta erotetussa järjestelmässä verkon käyttöä voidaan määrätyn ehdoin jatkaa myös maasulussa. [7]

Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteeseen kytketään niin sanottu sammutuskuristin, joka kompensoi verkon maakapasitansseja. Näin saadaan vikavirtaa edelleen pienennettyä, sillä oikean kokoisella sammutuskuristimen valinnalla maakapasitanssien

kautta kulkevien virtojen summa on likimain sama kuin kuristimen kautta kulkeva. Virtojen ollessa vastakkaissuuntaiset ne kumoavat toisensa ja maasulkuvirta jää pieneksi. [7]

Huonoista maadoitusolosuhteista johtuen Suomessa keskijänniteverkon maadoitustapana on useimmiten joko maasta erotettu tai sammutettu verkko. Keskeisin syy tähän on kosketusjänniteongelma. [7] Standardit SFS 6001 [12] ja SFS-EN 50341-1 [8] määrittävät suurjänniteasennuksissa ja voimajohtojen maadoituksissa sallitut kosketusjännitteiden arvot eri vian laukaisuajaille. Kosketusjännite on kosketeltavissa oleva osa maadoitusjännitteestä, joka puolestaan on vikapaikan tai maadoituselektrodin potentiaalinen ja kaukaisen neutraalin maan potentiaalinen erotus. Koska maadoitusjännite on maadoitusresistanssin ja sen kautta kulkevan maasulkuvirran tulo, voidaan kosketusjänniterajat huonosti johtavassa maassa usein saavuttaa helpommin rajoittamalla maasulkuvirtaa kuin parantamalla maadoituksia.

Suomen 245 kV ja 420 kV kantaverkko on suoraan maadoitettu, jolloin jokaisella asemalla muuntajan tähtipiste on maadoitettu suoraan tai kuristimen kautta. Verkkoa kutsutaan myös tehollisesti maadoitetuksi, sillä verkon niin sanottu maasulkukerroin on pienempi kuin 1,4. Tällöin maasulun aikana terveiden vaiheiden vaihejännitteet nousevat korkeintaan 1,4-kertaiseksi. Kyseisen maadoitustavan avulla saadaan myös selkeä indikaatio maasulusta, sillä maasulkuvirta on oikosulkuvirran luokkaa. Suoraan maadoitettu verkko vaatii kuitenkin suurista vikavirroista johtuen lyhyet vian laukaisuajat. Suomen kantaverkossa laukaisuajat ovat 0,05–0,5 sekuntia [13]. Tyypillisesti 420 kV johdoilla ajat ovat alle 0,2 sekuntia. Myös vaarajännitteiden kannalta tilanne on huono, joten pylväiden ja laitteiden maadoitusten täytyy olla riittävän hyviä. Pääsääntöisesti siirtoverkon kaikki pylväät maadoitetaan yksittäisiä tapauksia lukuun ottamatta. [14]

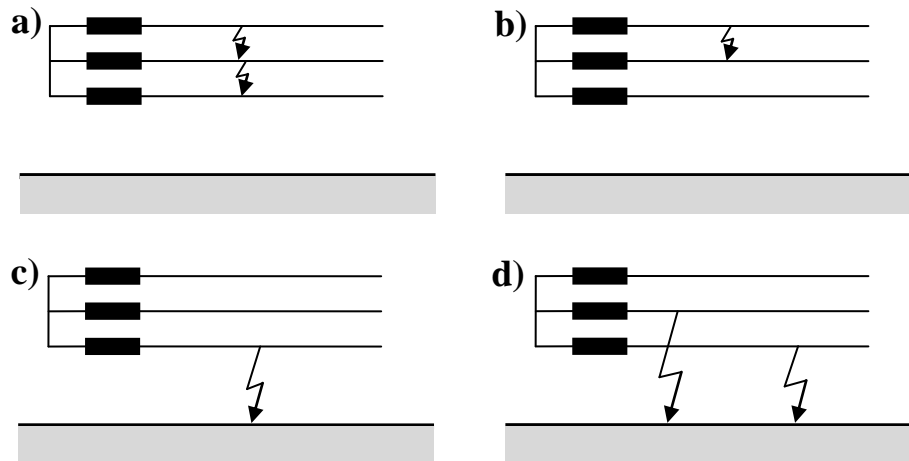
Suomessa 123 kV verkko puolestaan on maadoitettu vain tietyiltä asemilta. Kuitenkin käytäntö on ollut se, että joka paikasta on yhteys johonkin maadoitettuun 123 kV tähtipisteeseen. Maadoitustavan valinta perustuu siihen, että maasulkuvirta on riittävän suuri, jotta suojaukseen käytetty distanssirele pystyy toimimaan selektiivisesti maasuluissa. Toisaalta maasulkuvirtaa on rajoitettu sen verran, että vikapaikassa maadoitusjännitteet pysyisivät pienempinä. Sammutettua verkkoa käytetään suurin piirtein Rovaniemen korkeudelta pohjoiseen sijaitsevassa 123 kV verkossa. [14]

## 2.2 Vikatyypit ja -virrat

Suurin osa sähkönkäyttäjien kokemista sähkökatkoista tapahtuu keskijänniteverkossa. Vioista noin 10 % tapahtuu muualla, käytännössä sähköasemilla ja 123–420 kV johdoilla. [7] Voimajohtojen vikatiheydet ovat suurista vaiheväleistä ja puuvarmoista johtokaaduista johtuen suhteellisen pieniä. Puuvarmalla johdolla tarkoitetaan sitä, että voimajohdon alapuolella ja reunoilla olevan kasvuston kasvua rajoitetaan. Tällöin johtokadulla ja sen reunoilla olevat puut eivät voi kaatuessaan missään tilanteessa osua vaihejohtimiin. Kantaverkkoyhtiö Fingridin avojohtojen vuotuinen keskimääräinen vikatiheys

on 420 kV johdoilla 2,5 kpl/1000 km, 245 kV johdoilla 7,6 kpl/1000 km ja 123 kV johdoilla 19,2 kpl/1000 km<sup>1</sup>. [15]

Voimajohdoilla tapahtuvat viat voidaan pääsääntöisesti määritellä muutamalla perustapauksella sekä niiden yhdistelmillä. Perustapauksia ovat kolmi- ja kaksivaiheinen oikosulku sekä yksivaiheinen maasulku. Lisäksi näiden yhdistelmistä voidaan mainita oikosulut maakosketuksella ja kaksoismaasulku, jossa tapahtuu kahdessa eri vaiheessa ja eri kohdassa samanaikainen maasulku. Vikatilanteet on esitetty kuvassa 2.1.



**Kuva 2.1.** Periaatteelliset kuvat yleisimmistä vikatilanteista. A: kolmivaiheinen oikosulku. B: kaksivaiheinen oikosulku. C: yksivaiheinen maasulku. D: kaksoismaasulku.

Kolmivaiheinen oikosulku voi syntyä salaman tai virheellisen käytön aiheuttamasta ylilyönnistä esimerkiksi laitteistossa tai pylväällä. Tyypillisin tapaus on, kun salama iskee voimajohdon ukkosjohtimiin ja aiheuttaa niin sanotun takaiskun. Tällöin ylilyönti tapahtuu pylvästä virtajohtimiin aiheuttaen näin kolmivaiheisen oikosulun maakosketuksella. Kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen vika, joka tarkoittaa, että vian aikaiset vaihejännitteet ja -virrat ovat yhtä suuret. Tästä syystä sen aikaisten vikavirtojen laskenta on verrattain yksinkertaista yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta on maasta erotetussa verkossa vikavirroista suurin ja näin ollen verkon ja laitteiden mitoituksen kannalta määräävin. Tehollisesti maadoitetussa verkossa voi kuitenkin tietyissä tilanteissa esiintyä myös kolmivaiheista oikosulkuvirtaa suurempia vikavirtoja.

Maasulku syntyy, kun voimajohdon vaihejohdin joutuu johtavaan yhteyteen maahan. Tyypillisesti 1-vaiheinen maasulku on ukkoson aiheuttama valokaari vaihejohtimesta pylvääseen tai takaiskuna toisinpäin. Ukkosen aiheuttama ylilyönti tapahtuu yleensä siihen vaiheeseen, jolla on salaman iskuhetkellä korkein vastakkaisen polariteetin omaava jännitteen arvo [16]. Maasulussa maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa oleellisesti verkon käyttömaadoitustapa. Mikäli verkko on tehollisesti maadoitettu, voi maasulkuvirta lähellä generaattoria olla jopa suurempi kuin kolmivaiheinen vikavirta, jol-

<sup>1</sup> Tiedot ovat lähteestä [15], mutta niiden suuruusluokka on Jarmo Elovaaran kanssa käydyn keskustelun pohjalta korjattu vastaamaan lähdettä [1].

loin se on myös mitoituksen kannalta määräävin. [14] Jos verkko puolestaan on maasta erotettu, saattaa maasulunaikainen terveiden vaiheiden jännitteennousu aiheuttaa muualla verkossa toisen maasulun (esimerkiksi ylijännitesuojan kautta). Näin ollen syntyy kaksoismaasulku, jolloin maassa alkaa kiertää vikapaikkojen välillä huomattava maavirta, joka voi indusoida vaarajännitteitä. Myös maasta erotetussa verkossa voi siis syntyä vian aikana induktiovaikutus. [3]

Verkon vikavirtojen suuruuteen vaikuttaa monia seikkoja. Tyypillisesti mitä kauempana syöttävästä asemasta vika tapahtuu, sitä pienempi on myös vikavirta. Lisäksi suuruuteen vaikuttavat verkon jännite ja oikosulkuteho. Vikatyypin vaikuttaa myös. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta on pienempi kuin kolmivaiheinen. Maasulkuvirta puolestaan on voimakkaasti riippuvainen verkon maadoitustavasta, mutta kuten edellä mainittiin, voi se saada jopa suurempia arvoja kuin kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Myös vikaimpedanssi vaikuttaa vikavirtaan, kuten myös vian aikainen kuormitus, vaikkakin sen vaikutus on hyvin vähäistä. [14]

Tulevaisuudessa oikosulkuvirrat tulevat sähkön kulutuksen myötä kasvamaan. Tähän ovat syynä uudet isommat voimalaitokset, muuntajien lisääntyminen ja niiden kojen kasvaminen. Myös uusien johtojen rakentaminen kasvattaa vikavirtoja. Tällä hetkellä oikosulkuvirrat vaihtelevat 420 kV voimajohdoilla Etelä-Suomen 20 kA Pohjois-Suomen alle 10 kA. [14]

### 2.2.1 Maasulkuvirta

Siirtoverkon yleisin vika on 1-vaiheinen maasulku [15]. Se on epäsymmetrinen vika, jonka laskenta poikkeaa symmetristen vikojen laskennasta hiukan työläämpänä. Tämä johtuu siitä, että laskennassa ei voida käyttää yksivaiheista sijaiskytkentää, vaan jokaista vaihesuuretta on tarkasteltava erikseen. Tämä onnistuu niin sanotuilla symmetrisillä komponenteilla, joita ovat nolla-, myötä- ja vastajärjestelmä. Järjestelmien avulla saadaan kunkin vaiheen hetkellisarvot laskemalla yhteen halutun vaiheen osoitinsuureet jokaisesta symmetrisestä järjestelmästä.

Epäsymmetristen vikojen tapauksissa symmetrisistä komponenteista muodostuvat komponenttiverkot kytkeytyvät toisiinsa vikatapauksesta riippuen eri lailla. 1-vaiheisessa maasulussa verkot kytkeytyvät sarjaan. Tästä syystä jokaisessa komponenttiverkossa kulkee sama virta, jolloin eri komponenttiverkkojen virtojen osoitinsuureet ovat yhtä suuret. Tällöin voidaan maasulun vikavirtaa  $I_F$  merkitä osoittimien summana

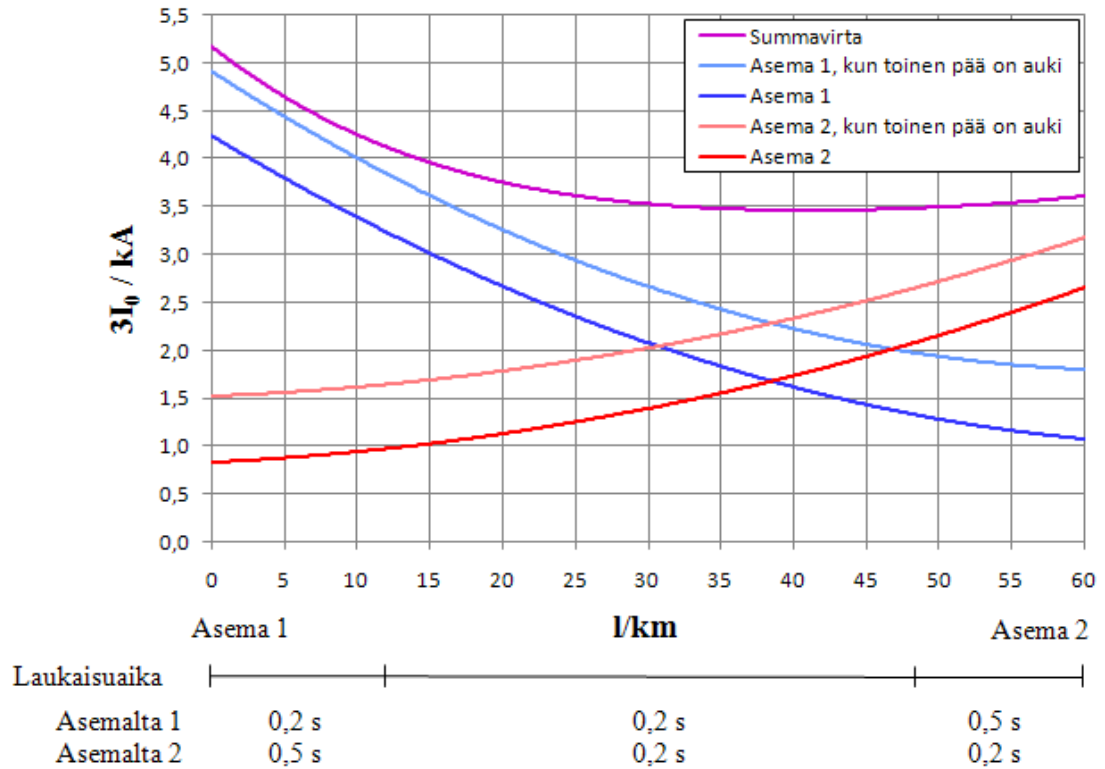
$$I_F = I_0 + I_1 + I_2 = 3I_0, \quad (1)$$

missä alaindeksillä 0, 1 ja 2 tarkoitetaan nolla-, myötä- ja vastaverkkoa. Kyseistä  $3I_0$ -merkintää käytetään yleisesti tarkoittamaan 1-vaiheista maasulkuvirtaa. [1]

Siirtoverkon maasulkuvirrat tietylle johdolle saadaan kuvan 2.2 mukaisesta epäsymmetriavirtapiirroksista. Piirroksessa on erikseen merkitty johdon molemmista suunnista tulevat maasulkuvirrat. Lisäksi epäsymmetriapiirroksissa on kahdesta suunnasta syötetylle johdolle merkitty vikavirrat, jotka tulevat vastakkaisesta päästä, mikäli toinen pää aukaistaan. Kyseisessä tilanteessa syöttävän päänsä vikavirta kasvaa.



Piirroksessa ylin viiva on molempien suuntien summavirta, jota käytetään maapotentiaali- ja kosketusjännitetarkasteluissa. Induktiovaarajännitetarkasteluissa käytetään jommasta kummasta suunnasta tulevaa vikavirtaa. Piirroksen merkitään myös laukaisuaikat molemmista syöttösuunnista, joista nähdään kuinka nopeasti miltäkin vyöhykkeeltä laukaisu syöttösuunnittain tapahtuu.

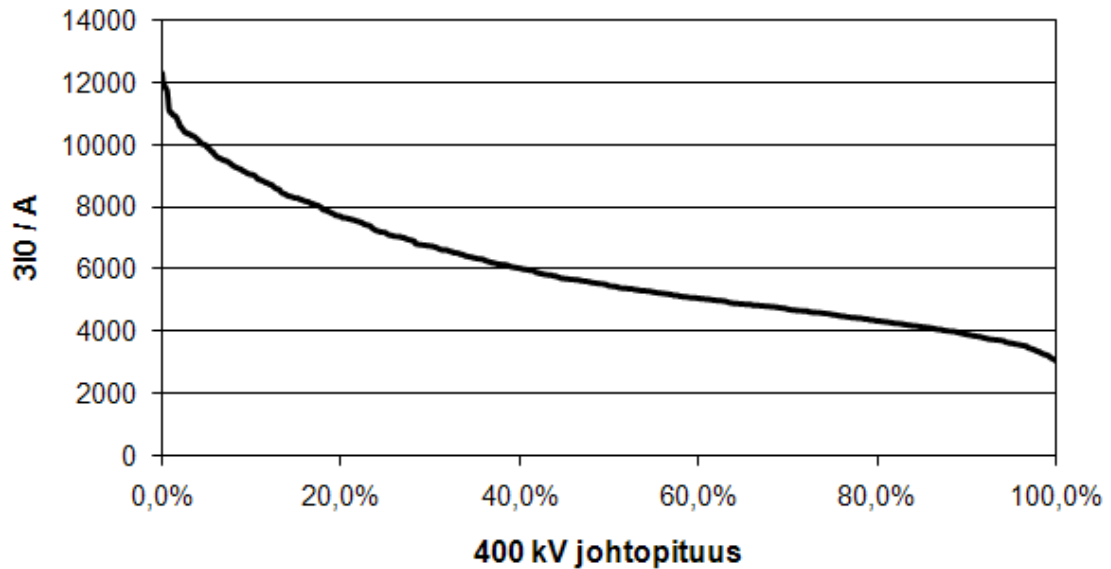


**Kuva 2.2.** Epäsymmetriavirtapiirros eräästä Suomessa sijaitsevasta 123 kV johdosta. Kuvasta nähdään  $3I_0$ -arvot sekä laukaisuaikat eri etäisyyksillä tapahtuvissa maasuluissa. [5]

Suomen siirtoverkon osalta maasulkuvirtoja lasketaan kantaverkkoyhtiö Fingridissä ja Empower Oy:ssä, joka edelleen vastaa Pohjolan Voima Oy:n entisten verkkoasiakkaiden verkostolaskennasta ja käyttötoimenpiteistä. Näiltä tahoilta maasulkuvirtoja voi olemassa olevalle tai suunniteltavalle johdolle tiedustella vaarajänniteselvitysten tekoa varten. Käytännössä myös johdon omistajalla tulee olla tiedot johdon maasulkuvirroista, mutta ajantasaisimmat tiedot nyky- ja ennustetilanteesta saadaan Fingridistä. Johdon laukaisuaikat sen sijaan kannattaa varmistaa johdon omistajalta tai käyttäjältä.

Liitteessä 2 on Fingridiltä saadut tiedot vuoden 2011 yksivaiheisista maasulkuvirroista verkon solmupisteissä eri jännitetasoilla. Maasulkuvirran suuruus on kuvaajissa ilmoitettu solmupisteiden funktiona pysyvyyskäyrän muodossa. Solmupisteitä ovat sähköasemat tai haaroituspisteet, joihin verkkomallissa johdot liittyvät. [5]

Kuvassa 2.3 on puolestaan paremmin induktiovaarajännitetarkasteluihin soveltuvaa tietoa. Se on vuoden 2011 pysyvyyskäyrä 420 kV voimajohtojen suurimmista yhdestä suunnasta syötetyistä maasulkuvirroista johdon varrella tapahtuvien vikojen aikana. [5]



**Kuva 2.3.** Pysyvyyskäyrä 420 kV verkon yhdestä suunnasta syötetyistä maasulkuvirroista johdon varrella tapahtuvissa maasuluissa Suomessa 2011. [5]

Pylväällä tapahtuvassa maasulussa voimajohtoa pitkin vikapaikkaan virtaava epäsymmetriavirta jakautuu pylväällä kulkemaan maahan maavirraksi  $I_e$  ja voimajohdon mahdollisiin ukkosjohtimiin virraksi  $I_{ui}$ . Kun johdin kytkeytyy maahan vian seurauksena, syntyy maahan virtauskenttä, jota syöttävät esimerkiksi pylvään maadoituselektrodit. Jotta maassa kulkevan maavirran vaikutuksia voitaisiin tarkastella, tulisi maavirran jakautuminen maassa tuntea. Kyseessä olisi hyvin monimutkainen kolmiulotteinen ongelma, jos koko johtoa käsiteltäisiin kokonaisena. Tarkastelujen yksinkertaistamiseksi tarkasteluissa jätetäänkin johdon päät pois olettaen johdon päät äärettömän kauaksi tarkastelukohdasta. [17]

1920-luvulla toisistaan riippumatta virranjakoa maassa tutkineet tiedemiehet Carson ja Pollaczek onnistuivat johtamaan yhtälöt virran jakautumiselle maan pinnalla eri etäisyydellä johdosta. Yhtälöt ovat hyvin monimutkaisia, mutta lopputuloksena niistä selviää, että 50 Hz maavirta jakautuu maassa siten, että sen kohtaama resistanssi  $R_m$  on noin 50 mΩ/km (yhtälö (21)). Resistanssi on myös lähes riippumaton maan ominaisresistansista, mikä tarkoittaa, että virran on levittäydyttävä sitä laajemmalle, mitä suurempi maan ominaisresistanssi on. Yhtälön (21) mukaan resistanssi on vain taajuudesta riippuva vakio. Tarkka arvo vaihtelee  $\pm 10\%$  todella pienillä ja suurilla maan ominaisresistivisyyden arvoilla. [17]

Homogeenisessa maassa syöttöasemalle palaava maavirta jakaantuu poikkipinnaltaan suunnilleen puoliympyrän muotoisesti keskittyen sitä tiiviimmin voimajohdon alle, mitä suurempi sen taajuus on ja mitä pienempi maaperän ominaisvastus on. Reaktiivisen kulkuvastuksen takia maavirta on eri vaiheinen puoliympyrän keskellä kuin sen reunoilla. [11] Maavirran leviämisalueen suuruusluokka saadaan selville, jos oletetaan virrantiheyden ja virran vaiheen olevan vakioita. Puoliympyrän säteeksi  $r$  saadaan esimerkiksi Suomen oloissa ( $\rho = 2300 \Omega\text{m}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ )

$$r = \sqrt{\frac{16\rho}{\pi\omega\mu_0}} \approx 5450 \text{ m}, \quad (2)$$

missä  $\rho$  on maan ominaisresistiivisyys,  $\omega$  kulmataajuus ja  $\mu_0$  tyhjiön permeabiliteetti. Tämä vastaa poikkipinnaltaan puoliympyrän muotoisen virran kulkutien noin  $46,7 \text{ km}^2$  poikkipinta-alaa. [18]

Maavirran magneettisten vaikutusten periaatteellisessa tarkastelussa voidaan tietyin oletuksin, joista enemmän kappaleessa 3.2.2, koko maavirta likimääräisesti olettaa kulkemaan syvyydellä

$$h = 1,85 \sqrt{\frac{\rho}{\omega\mu_0}} = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (3)$$

jolla laskettuna saadaan Suomessa arvo  $4470 \text{ m}$ . Koska maavirta tunkeutuu maassa näin syvälle ja laajalle alueelle, ei riitä pelkän maan pintakerroksen ominaisresistiivisyysarvon tunteminen, vaan joudutaan ottamaan huomioon myös syvempien kerrosten resistiivisyysarvot. [19]

Maasulkuvirran maassa kulkevan maavirran reittiin ja jakaantumiseen vaikuttavat maavirran taajuus ja maan ominaisresistiivisyys. Kun kyseessä on vaihtosähköpiirin maasulku, maavirta seuraa maasulkuvirtaa syöttävän voimajohdon reittiä hyvin tarkasti tehden samat mutkat kuin voimajohtokin. [20]

## 3 INDUKTIO

### 3.1 Induktion teoria

Faradayn laki sähkömagneettisesta induktiosta on yksi tärkeimpiä sähkömagneetiikan lakeja. Michael Faraday muotoili lakinsa vuonna 1831 havaittuaan, että suljettuun johdinsilmukkaan muodostuu virta, kun magneettia liikutetaan silmukkaa kohti tai siitä poispäin. Tämä ilmiö luo pohjan koko nykyiselle sähkönkäytölle, jossa pyörivillä generaattoreilla tuotetaan sähköä.

Virrallinen johdin muodostaa ympärilleen magneettikentän Ampère(-Maxwell) yhtälön mukaisesti. Yhtälön mukaan magneettikenttä koostuu magneettivuosta eli toisin sanoen vuoviivoista, jotka kiertävät virrallisen johtimen ympärillä myötäpäivään virran kulkusuuntaan katsottaessa. Magneettivuon tiheys pienenee johtimesta kauemmas mentäessä, mutta muuten vakiona pysyvällä virralla myös magneettikenttä pysyy vakiona. Näin ollen tasavirtapiirit eivät aiheuta muuttuvaa magneettikenttää ympäristöönsä muuten kuin silloin, kun virran suunta tai suuruus muuttuu esimerkiksi virtapiirin sulkeutussa tai avautuessa.

Vaihtovirralla puolestaan jännitteen polariteetti muuttuu koko ajan, ja näin ollen myös virran kulkusuunta vaihtelee. Tästä edelleen seuraa, että virtajohtimen aiheuttama magneettikenttä johtimen ympärillä on jatkuvassa muutostilassa.

Faradayn laki sähkömagneettisesta induktiosta kuvaa sitä, kuinka magneettivuon muutos tietyn silmukan lävitse indusoi silmukkaan sähkömotorisen voiman eli  $\text{smv:n}$ , jonka yksikkönä on voltti. Magneettikenttä itsessään ei siis vielä induktiota aiheuta, vaan sen muutos. Tästä syystä joko silmukan on liikuttava vakiona pysyvässä magneettikentässä tai toisinpäin. Indusoituvan  $\text{smv:n}$  polariteetti on aina sellainen, että se pyrkii aiheuttamaan silmukkaan virran, joka kumoaisi ulkoisen magneettikentän muutoksen.

### 3.2 Voimajohdon indusoimat $\text{smv:t}$

Voimajohdolla mahdollisia indusoivia virtoja on monia. Käytännössä pahimmat tilanteet ovat kuitenkin normaalissa käyttötilanteessa vaiheiden erilaisista etäisyyksistä johtavaan rakenteeseen johtuvan summamagneettikentän sekä voimajohdon maasulussa muodostuvan virtasilmukan muodostaman magneettikentän indusoimat  $\text{smv:t}$ . Voimajohdolla induktion suuruus on merkittävää käytännössä vain 123 kV ja sitä suuremmilla jännitteillä. Näillä jännitetasoilla olevat kuormitusvirrat ovat riittävän suuria normaaliikäytönaikaiseen induktioon, ja myös maasulkuvirrat ovat verkon maadoitustavan takia suuria. Keskijänniteverkon pienistä maasulkuvirroista johtuen (noin kymmeniä ampee-

reja) niiden induktiovaikutuksista ei ole vaaraa ellei verkkoa käytetä pysyvässä maasu-  
lussa. [13]

Tässä työssä ei puututa sähköistettyjen rautateiden induktiovaikutuksiin. Sähköiste-  
tyt rautatiet ovat kuitenkin yhtäläillä ongelmallisia kuin voimajohdotkin, joten pieni  
tietämys niiden indusoivista virroista on paikallaan. Sähköistetyillä rautateilla palaa osa  
junan käyttövirrasta maan ja kiskojen kautta kohti syöttöasemaa. Keski-Euroopassa il-  
miö ei aiheuta yhtä suuria ongelmia kuin se Suomessa aiheuttaa. Tämä johtuu maan  
johtavuudesta. Suomessa häiriöiden poistamiseksi on sähköradoilla asennettava pylväi-  
siin paluujohdin, johon maassa ja kiskoissa kulkeva paluuvirta saadaan imumuuntajien  
avulla. Eristetty paluujohdin yhdistetään suoraan maahan noin 2,5 km välein. Imumuun-  
tajat sijoitetaan maadoituspisteiden välisen osuuden puoleen väliin ajo- ja paluujohti-  
men välille. Ilman näitä menettelyjä maassa kulkevat paluuvirrat indusoisivat häiriöjän-  
nitteitä hyvin laajalle alueelle. [13]

Voimajohdon yksittäisten vaihejohtimien kapasitanssit maahan nähden eroavat toi-  
sistaan. Tästä syystä maahan virtaa kapasitiivinen jäännösvirta, joka palaa maadoitettui-  
hin tähtipisteisiin tai jää kiertämään voimajohdon vuorotteluosien välille. Virran suu-  
ruus Suomessa käytettävillä vuorottelupituuksilla jää kuitenkin korkeintaan muutamaa  
ampeeriin. Maavirtaa pienentää edelleen ukkosjohtimien reduktiovaikutus [21]. [13]

Normaali käyttövirta indusoi myös ukkosjohtimiin smv:n, jonka muodostaman vir-  
ran eräs komponentti palaa maan kautta. Induktion voimakkuus riippuu johtimien geo-  
metrisesta asettelusta ja on Suomessa yleisesti käytetyllä porttaalipylväällä pienempi  
kuin Keski-Euroopassa yleisellä tannenbaum-pylväällä. Tämä johtuu ukkosjohtimien  
hyvin epäsymmetrisestä asettelusta vaihejohtimiin nähden. Hyvin johtavilla ukkosjoh-  
timilla tannenbaum-pylväissä maavirrat saattavat nousta jopa yli 100 ampeeriin. [13]  
Kolme erilaista pylväsmallia on esitetty liitteessä 3.

Suurilla jännitteillä kuten 245 kV ja erityisesti 420 kV esiintyy koronapurkauksia.  
Purkaukset sattuvat jännitteen huippuarvon kohdalla, jolloin koronavirta tulee piikki-  
mäiseksi. Tässä virrassa kolmas yliaalto on voimakas, ja koska se on joka vaiheessa  
samanvaiheinen, virta summautuu tähtipisteessä ja palaa maan kautta. Pitkillä johdoilla  
kertyy koronasta huomattava 150 Hz virta. Korona on voimakkainta sateella ja huurtei-  
sillä johdoilla. Kovalla huurteella on mitattu 520 km pituisen 420 kV johdon päissä  
50 A luokkaa olevia 150 Hz virtoja. [22]

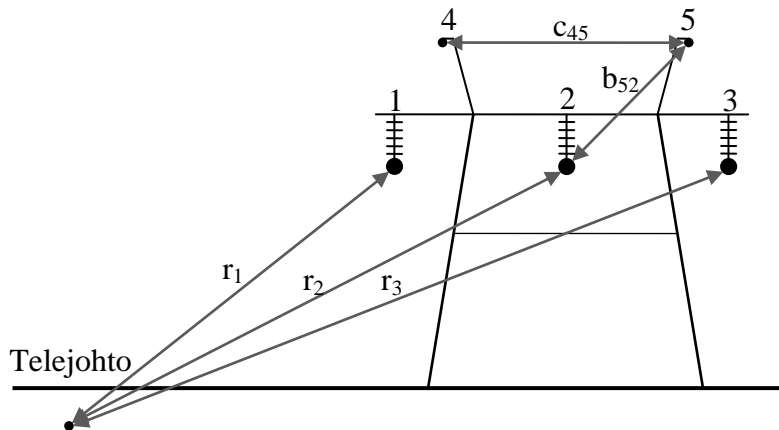
### 3.2.1 Normaalikäytössä indusoituva smv

Normaalikäytössä voimajohdon vaihejohtimien virrat ovat symmetrisiä ja  $120^\circ$  vaihe-  
siirrossa toisiinsa nähden. Jos vaihejohtimet olisivat samankeskkiset, niiden muodosta-  
mat magneettikentät kumoaisivat toisensa ja summamagneettikenttä olisi nolla. Voima-  
johtopylväissä vaihejohtimet kuitenkin ovat toisistaan erillään, jolloin niiden etäisyydet  
esimerkiksi mahdollisesta rinnalla kulkevasta telejohdosta ovat erilaisia (kuva 3.1).  
Tällöin vaiheiden muodostamat magneettikentät eivät kumoakaan toisiaan, ja jäljelle  
jäävä magneettikenttä indusoi voimajohdon suuntaiseen johtavaan rakenteeseen smv:n.  
Smv  $E$  suuruus voidaan pituutta  $l$  kohti laskea yhtälöstä

$$\frac{E}{l} = \frac{-j\omega\mu_0 I}{4\pi} \left( \ln \frac{r_1 r_3}{r_2^2} \pm j\sqrt{3} * \ln \frac{r_3}{r_1} \right), \quad (4)$$

jossa  $I$  on voimajohdossa kulkeva virta ja  $r$ :t kuvan 3.1 mukaiset etäisyydet. Toisen termin etumerkki riippuu siitä, kummalla puolella voimajohtoa telejohto sijaitsee. Yksiköksi yhtälöstä saadaan V/m.

Käytännössä normaalikäytössä olevan voimajohdon indusoima smv riippuu siis vaiheiden ja telejohdon välisistä etäisyyksistä, sekä yhdensuuntaisen osuuden pituudesta  $l$ . Normaalikäytössä on kuitenkin huomioitava myös voimajohdon vuorottelu, mikäli se sijoittuu tarkasteltavalle osuudelle. Vuorottelukohdassa indusoituvan smv:n vaihekulma muuttuu  $120^\circ$ , joka on otettava huomioon smv:tä yhteen laskettaessa. [13]

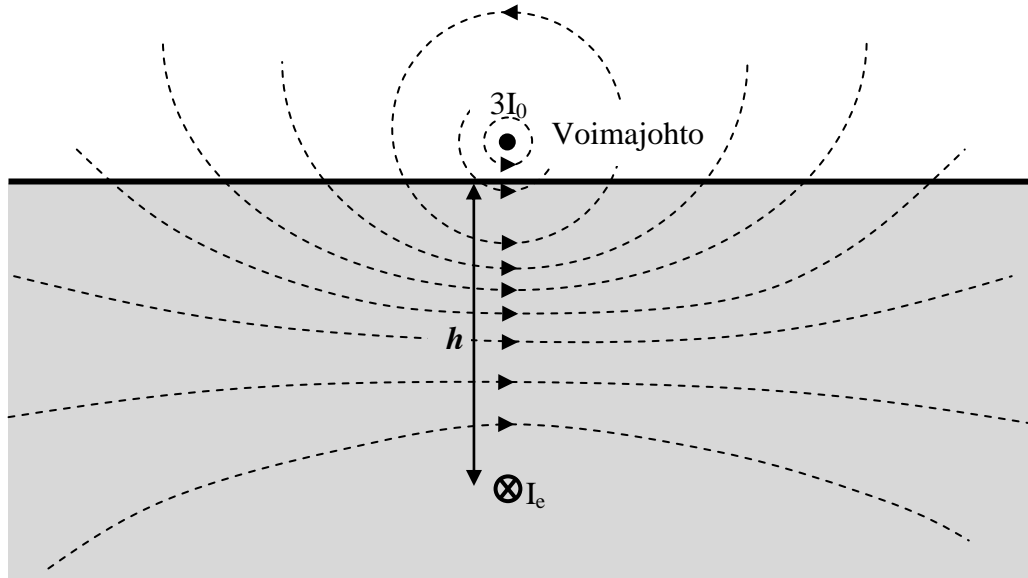


**Kuva 3.1.** Telejohdon sekä vaihe- ja ukkosjohtimien välisten etäisyyksien indeksointia selventävä kuva.

Käytännössä käyttövirta indusoi harvoin vaarallisen suuria jännitteitä. Esimerkiksi telejohtoihin indusoituvalle pitkittäiselle smv:lle sallitaan korkeintaan 60 V jatkuvassa tilassa [23].

### 3.2.2 Vikatilanteessa indusoituva smv

Induktiovaarajännitteiden kannalta pahimmat induktiovaikutukset tapahtuvat vikatilanteissa. Vikatyypinä pahin on 1-vaiheinen maasulku. Sen suuri indusoiva vaikutus johtuu hyvin syvälle maahan menevästä vikavirrasta (yhtälö (3)). Esimerkiksi pylväällä tapahtuvassa maasulussa maavirta menee maahan ja kulkeutuu sieltä syöttävälle asemalle, josta se nousee maadoitetusta tähtipisteestä takaisin vaihejohtimeen. Tällöin muodostuu hyvin laaja virtasilmukka, jonka muodostama magneettikenttä ulottuu hyvin kauas. Suomessa kyseisen magneettikentän induktiovaikutus ulottuu jopa 10–15 kilometrin etäisyydelle. Periaatteellinen kuva magneettikentän muodostumisesta on kuvassa 3.2. Kuvassa on laajalla alalla kulkeva maavirta korvattu syvyydellä  $h$  olevalla sijaisjohtimella yhtälön (3) mukaisesti. [13]



**Kuva 3.2.** Voimajohdon maasulussa maasulkuvirran muodostama virtasilmukka ja sen magneettikenttä. Maassa palaava maasulkuvirran  $3I_0$  osa  $I_e$  kulkee syvyydellä  $h$ .

Tehollisesti maadoitetuissa siirtoverkoissa 1-vaiheinen maasulkuvirta on kolmivaiheisen oikosulkuvirran suuruusluokkaa [15]. Induktio tarkasteluissa kolmivaiheinen oikosulkuvirta ei kuitenkaan ole mitoittava tekijä, sillä se ei välttämättä muodosta laajaa virtasilmukkaa. Näin ollen sen induktiovaikutus rajoittuu huomattavasti pienemmille etäisyyksille kuin maasulkuvirran.

Voimajohdon kaksoismaasulun aikana voi tietyssä tilanteessa syntyä yksivaiheista maasulkuvirtaakin suurempi maavirta. Kaksoismaasulut ovat kuitenkin siirtoverkossa niin harvinaisia, ettei niitä harvinaisuutensa vuoksi ole syytä ottaa huomioon. Jos siirtoverkko on maasta erotettu, on kaksoismaasulkujen vaikutus merkittävämpi. [10] [24]

Voimajohdon maasulun indusoima smv  $E$  saadaan laskettua yhtälöstä

$$E = k3I_0Z_m, \quad (5)$$

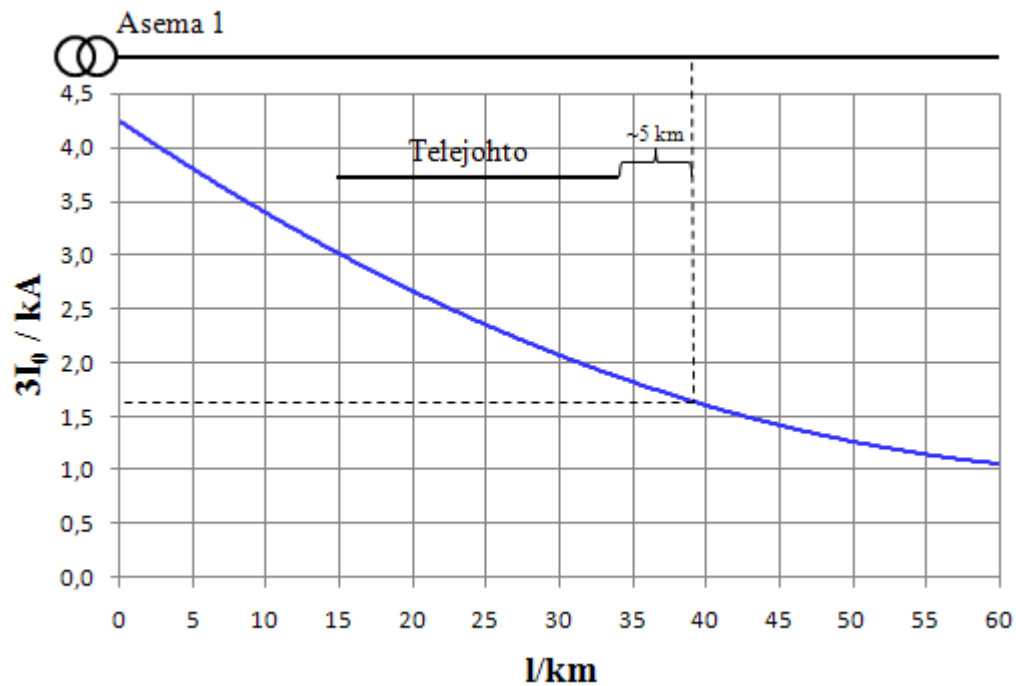
jossa  $k$  on reduktiokerroin,  $3I_0$  on maasulkuvirta ja  $Z_m$  voimajohdon ja induktion kohteen välinen keskinäisimpedanssi [25]. Reduktiokerroin  $k$  on eri tekijöistä johtuvien reduktiokertoimien tulo. Näistä tärkein on ukkosjohtimista johtuva reduktiokerroin, joka on maavirran  $I_e$  suhde kokonaismaasulkuvirtaan  $3I_0$ . Kertoimen  $k$  käyttöä selitetään tarkemmin kappaleessa 4.

### Indusoiva vikavirta

Laskettaessa voimajohdon maasulussa indusoimaa smv:tä tulisi vikavirran suuruus tuntea tarkasteltavan voimajohdon joka pisteessä. Vikavirran suuruus saadaan epäsymmetriapiirroksista (Kuva 2.2).

Yhdestä suunnasta syötetyille johdolle vikavirran arvoksi valitaan kuvan 3.3 mukaisesti laskettavasta kohteesta noin 5 kilometrin päässä oleva arvo. Virta-arvoksi valitaan siis pienempi arvo kuin se olisi juuri kohteen kohdalla. Tämä johtuu maasulkuvirran

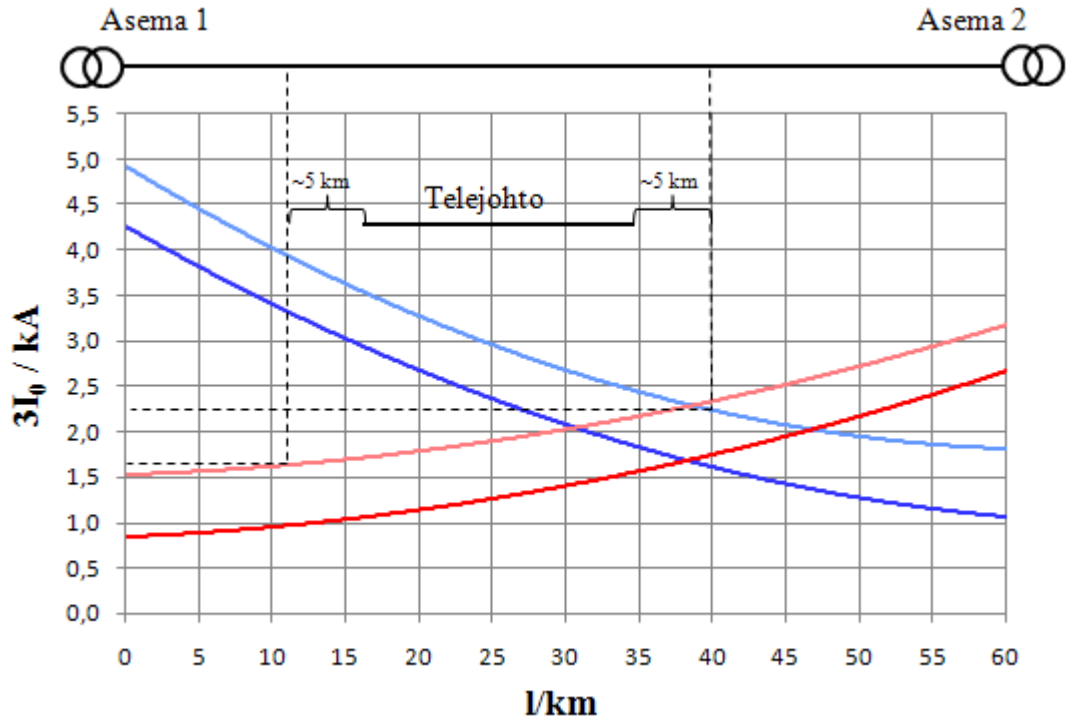
jakautumisesta maan ja ukkosjohtimien kesken ensimmäisillä jänneväleillä. Asiaan perehdytään tarkemmin kappaleessa 4.1.1. [25]



**Kuva 3.3.** Indusoivan vikavirran valinta yhdestä suunnasta syötetylle johdolle. [25]

Molemmista suunnista syötetyn johdon indusoivana vikavirtana käytetään kuvan 3.4 mukaisesti vastaavalla tavalla saatua virtaa, mutta virroista valitaan suurempi. Vaikka katkaisija johdon vikapäässä (joka yleensä syöttää suurempaa vikavirtaa) avautuu ensin tai yhtäaikaaisesti toisen pään kanssa, vastakkaisen pään katkaisija voi olla auki automaattisen jälleenkytkennän hetkellä ja on aina auki, kun katkaisija suljetaan manuaalisesti vikaa vasten. Tästä syystä laskelmat tulee tehdä virta-arvoilla, jotka saadaan johdolle vastakkaisen pään lauetuuta. [25][21]





**Kuva 3.4.** Indusoivan vikavirran valinta molemmista suunnista syötetylle johdolle. [25]

Indusoituvan smv:n sallittu arvo vaihtelee vian keston mukaan. Sallitut arvot on määritelty Viestintäviraston määräyksessä viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta. Arvot on lueteltu taulukkoon 7.2.

Jos maasulun virta muuttuu maasulun aikana, lasketaan sekä suurinta virtaa vastaava smv että koko maasulun kestoajaa vastaava smv. Arvoja verrataan kyseisen kestoajan mukaisiin raja-arvoihin. Suurimmalle indusoivalle virralle tulisi käyttää suurimman virran todellista kestoja, ja koko vian kestoajalle tulisi käyttää vian ekvivalenttista virta-arvoa. Ekvivalenttinen vikavirta saadaan laskettua yhtälöstä

$$3I_{0eq} = \sqrt{\frac{(3I_{01})^2 t_1 + (3I_{02})^2 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}}, \quad (6)$$

jossa  $t_1$  on  $3I_{01}$  kesto,  $t_2$  on  $3I_{02}$  kesto ja niin edelleen. [25]

### Keskinäisimpedanssi

Keskinäisimpedanssin voidaan ajatella olevan suure, joka kuvaa, kuinka voimakas induktiovaikutus kahden johtimen välillä on. Keskinäisimpedanssi yhdensuuntaisille maapaluupiirillisille johdoille on funktio, jonka muuttujina ovat johdinten etäisyys, maan ominaisresistiivisyys ja taajuus. Impedanssi on kompleksinen suure, joka ei koostu ainoastaan reaktiivisesta osasta. Keskinäisimpedanssi voidaan määrittellä olevan

$$Z_m = R_m + j\omega L_m. \quad (7)$$

Yhtälön reaalikomponentti  $R_m$  edustaa ”paluujohtimena” toimivan maan vastusta (Suomessa noin 50 mΩ/km) ja imaginäärikomponentti  $\omega L_m$  vastaa virtapiirien välistä keskinäisreaktanssia. Tarkat yhtälöt impedanssin laskemiseksi on esitellyt Carson ja

Pollaczek, mutta niitä on hyvin hankala käyttää. Niiden ratkaisemiseen tarvitaan numeerista integrointia. Tästä syystä on kehitetty yksinkertaisempia yhtälöitä, jotka ovat approksimaatioita Carsonin tai Pollaczekin yhtälöistä. [2] [10]

Kirjallisuuslähteestä riippuen annetut approksimaatioyhtälöt keskinäisimpedanssille vaihtelevat. Halutun yhtälön käyttö riippuu indusoivan ja indusoituvan kohteen välisestä etäisyydestä, maan ominaisresistiivisyydestä, virran taajuudesta, käytettävästä laskentatekniikasta ja halutusta laskentatarkkuudesta. Keskinäisimpedanssin laskentakaavat, käyrästöt sekä likiarvokaavat on esitelty ITU-T käsikirjassa<sup>2</sup> *“Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines”* osissa II ja III. [10] Muissa lähteissä olevat yhtälöt pohjautuvat usein kyseisessä käsikirjassa esitettyihin yhtälöihin.

Pesosen julkaisussa [19] keskinäisimpedanssi määritellään saatavan yhtälöstä

$$\underline{Z_m} = \frac{\omega\mu_0}{\pi\alpha a} \left( \ker' \alpha a + \frac{1}{\alpha a} \right) + \frac{j\omega\mu_0}{\pi\alpha a} \ker' \alpha a, \quad (8)$$

jossa  $a$  on voima- ja telejohdon välinen etäisyys,  $\ker'$  ja  $\ker'$  Kelvinin funktioita sekä

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}. \quad (9)$$

Kelvinin funktiot tekevät ratkaisusta monimutkaisen. Tästä johtuen yhtälöä voidaan tietyin oletuksin yksinkertaistaa. Yhtälön (9) mukaan kerroin  $\alpha$  saa Suomessa arvon  $4,143 \cdot 10^{-4}$ . Mikäli yhtälössä (8) oleva termi  $\alpha a < 0,25$ , yhtälö (8) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\underline{Z_m} = \frac{\omega\mu_0}{8} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2}{\gamma\alpha a} + \frac{1}{2} \right) = \frac{\omega\mu_0}{8} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{3,3}{\gamma\alpha a}, \quad (10)$$

jossa  $\gamma$  on vakio 1,781 (Neperin luku potenssiin Eulerin vakio). Yhtälöistä (3) ja (9) saadaan

$$h = 1,85 \sqrt{\frac{\rho}{\omega\mu_0}} = \frac{1,85}{\alpha} = \frac{3,3}{\gamma\alpha}, \quad (11)$$

joka voidaan edelleen sijoittaa yhtälöön (10). Näin saadaan niin sanottu Carson-Clem yhtälö keskinäisimpedanssille [19] [10]

$$\underline{Z_m} = \frac{\omega\mu_0}{8} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{a}. \quad (12)$$

Nyt maavirta voidaan ajatella korvatuksi syvyydessä  $h$  sijaitsevalla johtimella (Kuva 3.2). Tämän ehtona ollut  $\alpha a < 0,25$  määrittelee esimerkiksi Suomessa voimajohdon ja telejohdon väliseksi etäisyydeksi enintään noin 603 metriä. Kun laskelmissa pysytään tällä alueella, on laskelmissa syntyvä virhe yleensä alle 2,5 %. [10]

Lähteessä [10] esitellään keskinäisimpedanssille toinenkin sopiva likiarvoisyhtälö, joka soveltuu erinomaisesti tietokonelaskentaan. Sen käyttöalue on huomattavasti laa-

<sup>2</sup> Lyhenne tulee sanoista International Telecommunication Union. Käsikirja on standardeja tuottavan ITU-T sektorin tuotos, joka vuosina 1956–1993 tunnettiin nimellä CCITT (Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique).

jempi kuin Carson-Clem yhtälöllä, koska se on voimassa, kun  $\alpha a < 10$ . Sitä voidaan käyttää siis Suomessa etäisyyksillä, jotka ovat alle 24,1 km. Yhtälö ei ota huomioon johtojen korkeusvaihtelua maasta. Yhtälö on johdettu käyttämällä käyrän sovitusta todelliseen keskinäisimpedanssin kuvaajaan. Keskinäisinduktanssin reaali- ja imaginääri-komponentit lasketaan yhtälöistä (13) ja (14) pituutta kohti. Yhtälöissä  $x = \alpha a$ .

$$\begin{aligned} Re(L_m) = & 123,36 - 1,69x + 23,937x^2 - 4,9614x^3 + \\ & 0,44212x^4 - 0,01526x^5 + 0,001215e^x - \\ & 200\ln(x) \end{aligned} \quad (13)$$

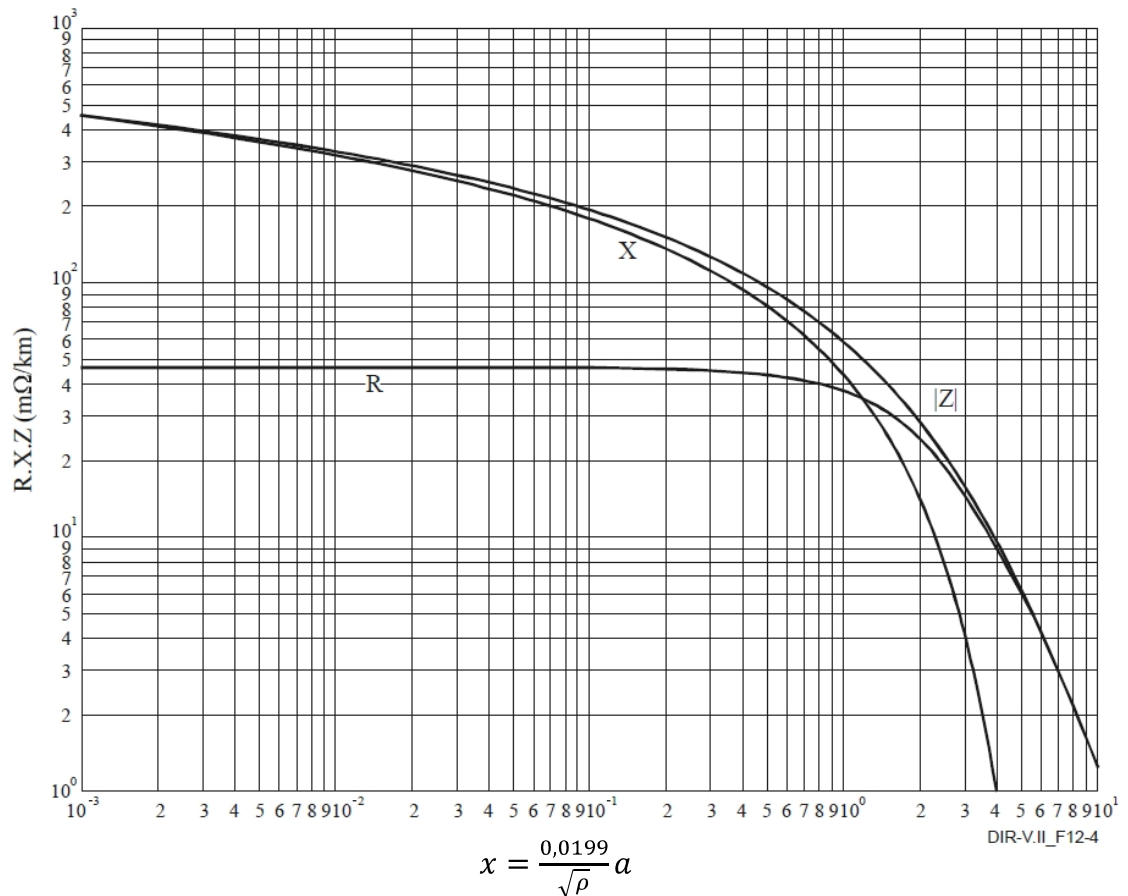
$$\begin{aligned} Im(L_m) = & -339 + 193,67x - 49,77x^2 + 6,979x^3 - \\ & 0,5243x^4 + 0,01672x^5 + 180,42e^{-x} - \\ & 0,00146e^x - 0,274\ln(x) \end{aligned} \quad (14)$$

Yhtälöiden yksiköksi saadaan  $\frac{\mu H}{km}$ . Lopulta keskinäisimpedanssi saadaan laskettua yhtälöstä

$$Z_m = j\omega L_m, \quad (15)$$

jossa  $L_m = Re(L_m) + Im(L_m)$ .

Keskinäisimpedanssin arviointiin voidaan käyttää myös erilaisia kuvaajia. Yksi tällainen on kuvassa 3.5. Siinä keskinäisimpedanssi on piirretty etäisyydestä  $a$  ja maan ominaisresistiivisyydestä  $\rho$  riippuvan yhtälön  $x = \alpha a$  funktiona taajuudella 50 Hz. Kuvaan on myös piirretty impedanssin reaali- ja imaginäärikomponentit. Kuvasta huomaa, kuinka pienillä etäisyyksillä  $R_m$ -komponentti pysyy vakioarvossaan lähellä 50 mΩ/km riippumatta maan ominaisresistiivisyydestä.



**Kuva 3.5.** Keskinäisimpedanssi ja sen reaali- sekä imaginäärikomponentit maan eri ominaisresistiivisyyden  $\rho$  ja etäisyyden  $a$  arvoilla 50 Hz taajuudella. [10]

### 3.3 HVDC

HVDC (high voltage direct current) on tasavirralla toimivaa tehonsiirtoa, jota käytetään tyypillisesti suurten tehojen siirtämiseen pitkillä etäisyyksillä, jolloin se on kustannuksiltaan kannattavampaa kuin vaihtosähköjohdoilla. HVDC:tä käytetään myös lyhyemmillä etäisyyksillä merikaapeleissa sekä kahden eri sähköjärjestelmän välisessä asynkronisessa tehonsiirrossa.

Koska tasavirta ei aiheuta muuttuvaa magneettikenttää, ei HVDC normaalikäytössä aiheuta häiriöitä. Normaalikäytössä magneettikenttä voi johdon ympärillä muuttua vain, mikäli johdossa kulkeva virta muuttuu. Normaalikäytössä virran muutosnopeus on noin 1 % nimellisestä virrasta per sekunti, mutta saattaa poikkeuksellisissa tilanteissa nousta jopa 200 %/s [21]. Normaalikäytön aikainen induktiovaikutus on siis hyvin pieni. Esimerkiksi ITU-T K.68 mukaan HVDC ei aiheuta induktion välityksellä minkäänlaista vaaraa ihmisille eikä vahinkoa tai häiriötä telelaitteistoille normaalikäytössä eikä minäkään vian aikana [24]. Tarkempia laskelmia ja mittauksia edellytetään vain, jos vaikutuksia ilmenee.

Toisaalta normaalikäytön aikainen induktiovaikutus tasavirralla poikkeaa vaihtovirralla tapahtuvasta, koska tasavirralla ilmajohtorakenteissa olevien johtimien magneetti-

kentät eivät kumoudu samalla lailla kuin vaihtovirralla kolmivaihejärjestelmässä. Magneettikenttä riippuu myös käytettävästä järjestelmästä, joita ovat mono- ja bi-polaarinen.

Tasavirtajohdon vikatilanteessa virran nousunopeus välittömästi vian syntymisen jälkeen on periaatteessa [10]

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_c}{L_{dc}}, \quad (16)$$

missä  $u_c$  on konvertterin jännitteen hetkellinen arvo ja  $L_{dc}$  dc-puolen kokonaisinduktanssi. Keskimääräinen arvo  $u_c$ :lle on yhtä suuri kuin dc-jännite. Jos vika tapahtuu konvertteriaseman lähellä, vaikuttaa induktanssiin vain tasoituskuristin. Esimerkiksi  $u_c=U_{dc}=400$  kV ja  $L_{dc}=0,4$  H,  $di/dt=1$  kA/ms. Kuitenkin jos käytössä on tasasähkösuodattimia, tarvitaan tarkempia laskuja. [21]

Konvertteriohjaus toimii noin viidestä kymmeneen millisekuntiin, joten virta ei kasva yli 2–6-kertaiseksi nimellisestä. Suojauksen toimittua virtapiikin jälkeen virta laskee nolllaan nopeudella, joka on sama kuin virran nousunopeus oli. [21]

## 4 REDUKTIOVAIKUTUS

Reduktiovaikutuksen voidaan ajatella olevan ukkosjohtimien ominaisuus ottaa maasulkuutilanteessa osa maasulkuvirrasta kuljetettavakseen, jolloin maan kautta palaava virta ja siitä aiheutuvat vaara- ja häiriövaikutukset pienenevät. [1] Reduktion vaikutuksesta virta siirtyy ukkosjohtimiin indusoitumalla. Pylväällä tapahtuvassa maasulussa maasulkuvirrasta osa siirtyy ukkosjohtimiin myös johtumalla. Reduktiovaikutuksen voidaan katsoa olevan yksi induktiivisen kytkeytymisen ilmenemismuoto.

Vaikka sana ”reduktiokerroin” usein mielletään juuri ukkosjohtimiin liittyväksi ker-toimeksi, on sillä varsinkin induktiovaarajännitteiden suhteen monia muitakin ilmene-mispaikkoja. Ukkosjohtimien lisäksi reduktiovirtoja voi indusoida kaikkiin voimajoh-don, kaapelin ja telejohdon läheisyydessä sijaitseviin johtaviin johtoihin ja rakenteisiin, kuten kaapelivaippoihin ja muihin telejohtoihin. [18]

Reduktiovaikutuksen tunteminen on induktiotarkasteluiden kannalta erittäin tärkeää. Tapauksesta riippuen sitä hyödyntämällä voidaan merkittävästi pienentää induktion voimakkuutta. On myös tärkeää tietää, mitkä kaikki asiat reduktiota voimajohdon maa-sulussa aiheuttavat ja kuinka paljon.

### 4.1 Voimajohdon reduktio

#### 4.1.1 Ukkosjohtimet

Ukkosjohtimilla on monenlaisia tarkoituksia, joista reduktiovaikutus on induktion kan-nalta hyvin tärkeä. Reduktiovaikutuksen lisäksi ukkosjohtimien tarkoituksena on estää suoraan vaihejohtimiin osuvat salamaniskut sekä pienentää huonoissa maadoitusolosuh-teissa resuloivaa maadoitusvastusta kytkemällä pylväät maadoituksineen rinnan. Jos ajatellaan ukkossuojausta, ei ukkosjohtimien johdinlajilla ole merkitystä. Sen sijaan reduktiovaikutukseen ukkosjohtimien johtavuus vaikuttaa ratkaisevasti. [1]

Ukkosjohtimiin indusoidut virrat voidaan jakaa hyödyllisiin ja haitallisiin virtoi-hin. Haitallisia virtoja ovat normaalin käyttövirran sinne indusoimat virrat. Ne lisäävät johdon häviöitä ja aiheuttavat häiriöitä aiheuttavia maavirtoja. Hyödyllisiä virtoja sen sijaan ovat vian aikaiset ukkosjohtimiin ja suurjännitekaapelilla kaapelivaippaan indu-soituvat virrat. [17]

Kun ukkosjohtimet ovat pieniresistanssisessa yhteydessä maasulussa olevaan pylvääseen ja maasulkuvirtaa syöttävän muuntajan tähtipisteeseen, indusoituu vaihejohtimissa kulkevasta virrasta ukkosjohtimiin virta

$$I_{ui} = \mu 3 I_0, \quad (17)$$

missä  $\mu$  on kytkentäkerroin ukkosjohtimien ja vaihejohtimien välillä. Kytkentäkerroin määritellään

$$\mu = \frac{Z_m}{Z_u}, \quad (18)$$

jossa  $Z_m$  on ukkos- ja vaihejohtimien välinen keskinäisimpedanssi ja  $Z_u$  ukkosjohtimien maapaluuimpedanssi. Molemmat ilmaistuna pituusyksikköä kohti.

Koska indusoitunut ukkosjohdinvirta palaa ukkosjohtimia pitkin syöttöpisteeseen, se ei kulkeudu lainkaan maahan ja aiheuta induktiivisia häiriöitä tai potentiaalın nousua pylväällä. Maasulussa maan kautta palaava osa vikavirrasta on

$$I_e = 3I_0 - I_{ui} = (1 - \mu)3I_0 = k_s 3I_0, \quad (19)$$

missä  $k_s$  on ukkosjohtimista aiheutuva reduktiokerroin. [21] Ukkosjohtimien reduktiokerroin voidaan laskea

$$k_s = \frac{R_u + j(X_u - X_m)}{R_u + R_m + jX_u}, \quad (20)$$

jossa  $R_u$  on rinnankytkettyjen ukkosjohtimien resistanssi,  $R_m$  paluujohtimena toimivan maan resistanssi (Suomessa noin  $50 \text{ m}\Omega/\text{km}$ ),  $X_u$  ukkosjohtimet-maa-piirin reaktanssi ja  $X_m$  ukkosjohtimien ja virtajohtimien välinen keskinäisreaktanssi. Arvot ovat pituusyksikköä kohden. Jos ukkosjohtimien lukumäärä on  $n$ , poikkipinta-ala  $A$ , säde  $r_u$ , ominaisvastus  $\rho_u$  ja suhteellinen permeabiliteetti  $\mu_r$ , saadaan

$$R_m = \frac{\omega\mu_0}{8}, \quad (21)$$

$$R_u = \frac{\rho_u}{nA}, \quad (22)$$

$$X_u = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{h}{r_e} + \frac{\mu_r}{4n} \right), \quad (23)$$

$$X_m = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{b}. \quad (24)$$

Yhtälöissä  $b$  on ukkosjohtimien geometrinen keskietäisyys virtajohtimista (kuva 3.1), toisin sanoen

$$b = \sqrt[3n]{b_{41} \cdot b_{42} \cdot b_{43} \cdot b_{51} \cdot b_{52} \dots} \quad (25)$$

ja  $r_e$  ukkosjohtimien muodostaman ”nipun” ekvivalenttisäde

$$r_e = \sqrt[n]{r_u c^{n-1}}, \quad (26)$$

jossa puolestaan  $c$  on ukkosjohtimien geometrinen keskietäisyys toisistaan (kuva 3.1). Kuvan 3.1 kahden ukkosjohtimen tapauksessa  $c$  on ukkosjohtimien välinen etäisyys. Yleisesti  $c$  voidaan laskea mielivaltaiselle määrälle ukkosjohtimia yhtälöstä (27). [19]

$$c = \sqrt[0,5n(n-1)]{c_{45} \cdot c_{46} \cdot c_{47} \dots c_{56} \cdot c_{57} \dots} \quad (27)$$

Reduktiokertoimen suuruuteen vaikuttavat siis merkittävästi ukkosjohtimien johtavuus, johon voidaan vaikuttaa materiaalin, poikkipinta-alan ja ukkosjohtimien

lukumäärän avulla. Reduktiokertoimen suuruuteen vaikuttavat myös maan ominaisresistiivisyys ja indusoivan virran taajuus. Taulukoidut reduktiokerroin-arvot ilmoitetaan usein eri taajuuksille ja erilaisille maan ominaisresistiivisyyksille.

Edelleen reduktiovaikutuksen suuruus on hyvin riippuvainen vaihe- ja ukkosjohtimien keskimääräisestä geometriasta. Pienen reduktiokertoimen kannalta ukkosjohtimien tulisi olla mahdollisimman lähellä vaihejohtimia. Portaali- ja pylväisjohtimien etäisyydet  $b$  ja  $c$  riippuvat suurin piirtein samalla tavalla pylvään mitoista, joten esimerkiksi nimellisjännitteeltään erilaisilla portaali- ja pylväisjohtimilla reduktiokerroin vaihtelee vain vähän. Sen sijaan tannenbaum-pylväisjohtimilla reduktiokerroin vaihtelee suuremmissa rajoissa ja se tulisikin laskea aina tapauskohtaisesti. Tyypillisesti tannenbaum-pylväisjohtimilla reduktiokerroin on suuremmista virta- ja ukkosjohtimien välisistä etäisyyksistä johtuen suurempi kuin portaali- ja pylväisjohtimilla. [19] Taulukossa 4.1 on esitelty reduktiokertoimia eri pylväisrakenteille.

**Taulukko 4.1.** Eri ukkosjohtimien reduktiokertoimia erilaisilla pylväisrakenteilla. [18]

Pylväislaji	Ukkosjohtimet		reduktiokerroin $k_s$		
	lukumäärä	johtimen nimitys	123 kV	245 kV	420 kV
1 portaali	2	35 St	0,95	0,96	
1 portaali	2	50 St	0,91	0,91	
1 portaali	2	Savo	0,54	0,54	
1 portaali	2	Suursavo	0,38	0,40	
1 portaali	2	Imatra	0,39	0,41	
1 portaali	2	Dotterel	0,37	0,42	0,45
1 portaali	2	Piper	0,35	0,38	0,41
1 portaali	2	Hawk	0,33		
2 portaalia	4	70 St			0,78
2 portaalia	4	Suursavo	0,23		
2 portaalia	4	Imatra	0,25		
1 donau	2	Imatra	0,44		
1 tannenbaum	1	50 St		0,96	
1 tannenbaum	1	Imatra	0,59		
1 tannenbaum	2	50 St	0,91	0,92	
1 tannenbaum	2	Savo	0,56		
1 tannenbaum	2	Rauma	0,49		
1 tannenbaum	2	Suursavo	0,43		
1 tannenbaum	2	Imatra	0,44		0,51
1 tannenbaum	2	Dotterel	0,49		
1 tannenbaum	2	Piper	0,40	0,45	
1 tannenbaum	2	Ibis			0,48
2 tannenbaum	4	Savo	0,40		



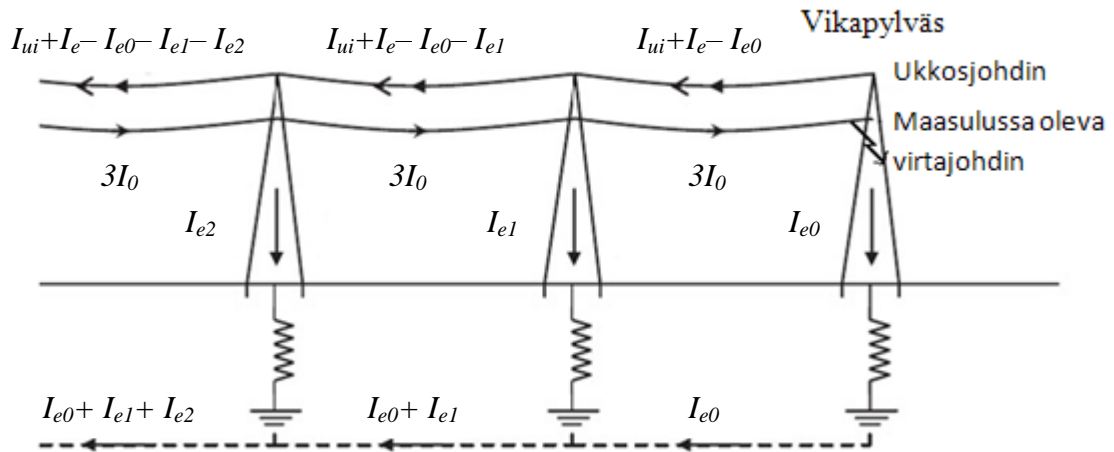
Reduktiokerrointa voidaan pienentää edelleen lisäämällä ukkosjohtimien lukumäärää. Esimerkiksi pylväässä vaihejohtimien alapuolelle sijoitettava niin sanottu reduktiojohdin pienentää reduktiokerrointa noin 20% [1]. Eltel Networks Oy:llä on käytössään tietokoneohjelma, jolla voidaan laskea mielivaltaisen ukkos- ja maajohdinjärjestelmän reduktiokerroin ja impedanssi maan ollessa paluupiirinä.

Kaikki ylimääräinen resistanssi, joka on sarjassa ukkosjohtimien kanssa, heikentää reduktiokerrointa ellei ylimääräisen resistanssin suuruus ole mitätön ukkosjohtimien resistanssiin nähden. Tällainen reduktiokerrointa heikentävä vaikutus on esimerkiksi sillä, jos ukkosjohtimia ei ole liitetty sähköisesti luotettavalla tavalla pylvääseen. Mikäli liitoksena toimii esimerkiksi vain kannatin, jonka varassa ukkosjohdin pylväästä roikkuu, saattaa siitä aiheutuva ylimääräinen resistanssi heikentää reduktiokerrointa. [21]

### **Virran jakautuminen vikapylvään lähellä**

Ukkosjohtimiin indusoituneen virran lisäksi ukkosjohtimissa kulkee myös toinen virtakomponentti. Pylväällä tapahtuvassa maasulussa osa maasulkuvirrasta kulkeutuu maahan heti pylvään ja sen maadoitusten kautta. Kuitenkin osa virrasta kulkeutuu ukkosjohtimiin ja lähtee niitä pitkin maasulkuvirtaa syöttävän aseman suuntaan. Ensimmäisten jännevälien aikana ukkosjohtimissa kulkeva virta on huomattavasti suurempi kuin kauempana vikapaikasta ukkosjohtimissa kulkeva virta. Tämä johtuu siitä, että ukkosjohtimissa kulkeva virta koostuu kahdesta komponentista: induktiivisesta virtakomponentista, joka indusoituu vaihejohtimessa kulkevasta vikavirrasta, sekä vikapylväältä ukkosjohtimiin johtuvasta vikavirran osasta. [20] Näitä kahta virtakomponenttia voidaan käsitellä kerrostamisperiaatteen mukaan matemaattisesti erillään [17].

Jos voimajohdon maasulkuvirta on vakio koko johdon matkalta, indusoituva vikavirta pysyy myös vakiona ukkosjohtimissa koko matkan syöttävälle asemalle saakka. Sen sijaan vikapylväältä ukkosjohtimiin johtumalla siirtyvä virran osa kulkeutuu lähipylväillä maadoitusimpedanssien ja ukkosjohdinten impedanssien muodostaman maadoitusimpedanssiketjun välityksellä maahan. Tietyn etäisyyden jälkeen suurin osa tästä virrasta on siirtynyt kulkemaan maata pitkin, ja ukkosjohtimissa kulkee vain maasulkuvirran sinne indusoima virta. Tässä vaiheessa vikavirta on jakautunut ukkosjohtimien ja maan välille reduktiokertoimen mukaisesti. [20] Virran jakautumista ensimmäisillä jänneväleillä havainnollistaa kuva 4.1.



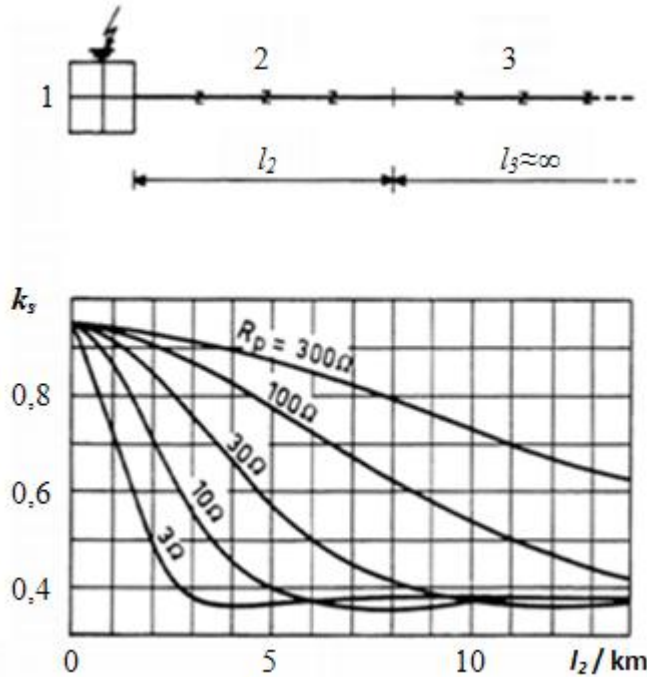
**Kuva 4.1.** Maasulkuvirran jakautuminen ensimmäisillä jänneväleillä.  $I_{ui}$  kulkee koko ajan ukkosjohtimissa, mutta  $I_e$  purkautuu vähitellen ukkosjohtimista maahan.

Etäisyyteen, jolloin ukkosjohtimiin johtumalla siirtynyt virta on siirtynyt kulkemaan maahan vaikuttaa ukkosjohtimien maapaluuimpedanssi ja pylväasmaadoitusten resistanssit [21]. Tästä syystä indusoivaa vikavirtaa valittaessa virta valitaan epäsymmetriavirtapiirrokselta noin viisi kilometriä vikapaikan ohi (Kuva 3.3). Tällöin virran jakautumisen vaikutus ei ulotu enää tarkasteltavana olevalle osalle, vaan virralla on epäsymmetriapiirroksen käyrän ilmoittama arvo koko tarkastelevalla osuudella. Viiden kilometrin nyrkkisääntöä voidaan käyttää vain Suomen olosuhteissa. [26]

Lähteessä [20] esitetään laskentayhtälöt tarkempaan laskentaan siitä, kuinka kauas ukkosjohtimissa kulkeva maavirta kulkeutuu. Laskennassa oletetaan jokaisen pylvään maadoitusresistanssi samaksi, minkä vuoksi laskennan tulos ei ole realistinen. Mikäli jokaiselle pylväälle käytettäisiin omaa maadoitusresistanssin arvoa, muodostuisi laskenta hyvin monimutkaiseksi.

### Reduktiokerroin ukkosjohdinten vaihtuessa

Ukkosjohtimien impedanssien vaihtuessa tarkasteltavalla välillä voidaan ukkosjohtimien reduktiokertoimet yhdistää niin sanotuksi resaltoivaksi reduktiokertoimeksi. Resaltoiva reduktiokerroin on reduktiokerroin, joka näkyy vikapaikasta. Resaltoivan reduktiokertoimen suuruuteen vaikuttaa vikapaikkaa edeltäneen ukkosjohdinlajin pituus kuvan 4.2 mukaisesti. Kuvaa luetaan siten, että mikäli feral-ukkosjohtimet ovat sähköasemalta eteenpäin 5 km ja maadoitusresistanssi on pylväillä  $30 \Omega$ , saadaan resaltoivaksi reduktiokertoimeksi asemalle noin 0,58.



**Kuva 4.2.** Resultoiva reduktiokerroin sähköasemalla 1, kun voimajohto-osalla 2 ukkosjohtimet ovat ferialia ( $k_s=0,38$ ) etäisyydelle  $l_2$ . Voimajohto-osalla 3 ukkosjohtimet ovat terästä ( $k_s=0,95$ ). Parametrina pylväismaadoitusten resistanssi  $R_p$ . [1]

Tällaisia käyrästäjä on piirretty useammillekin eri ukkosjohdinyhdistelmille. Kuvan 4.2 kaltaisia käyrästäjä tarkasteltaessa tulee kuitenkin muistaa, etteivät pylväiden maadoitusresistanssiarvot ole koskaan vakioita vaan vaihtelevat hyvinkin laajalla alueella. Kuvan 4.2 mukaiset käyrästäjä pätevät myös johdolla olevalle vikapaikalle, sillä vikapylvä voidaan ajatella asemaksi. [27]

#### 4.1.2 Suurjännitekaapeli

Myös suurjännitekaapelin johtavalla vaipalla on reduktio-ominaisuus. Siihen indusoituvat virrat voidaan myös jakaa hyödyllisiin ja haitallisiin, mutta kaapelirakenteella voidaan vaikuttaa haitallisten virtojen indusoitumiseen. Haitallisia virtoja indusoituu vaippaan normaalista käyttövirrasta yksivaiheisissa kaapeleissa tai epäsymmetristen virtojen tapauksessa kolmivaiheisissa kaapeleissa. Jos kaapelin vaippa on maadoitettu molemmista päistä, maasulkutilanteessa metalliseen vaippaan indusoitunut virta kiertää maan ja vaipan kautta. Tämä virta on osa vikapaikkaan saapuvasta maasulkuvirrasta. Loppuosa maasulkuvirrasta palaa syöttöpisteeseen maan kautta. Ukkosjohtimien tapaan virta jakaantuu kaapelin vaippaan ja maahan reduktiokertoimen mukaisesti. Kaapelilla reduktiokertoimeen vaikuttavat kaapelin rakenne, maadoitustapa, metallisen vaipan tai armeerauksen materiaali, vaipan maadoitusresistanssit ja maan resistiivisyys. [20] Taulukossa 4.2 on esitetty lähteessä [10] esiteltyt karkeat arviot reduktiokertoimille. Tarkat arvot saadaan tapauskohtaisesti kaapelivalmistajilta.

**Taulukko 4.2.** Suurjännitekaapeleiden reduktiokertoimia. [10]

Lyijyvaippainen kaapeli	reduktiokerroin
110 kV – 150 kV, 240 mm <sup>2</sup>	0,15 – 0,3
275 kV, 600 mm <sup>2</sup>	0,1 – 0,25
400 kV, 1000 mm <sup>2</sup>	< 0,2
Alumiinivaippainen kaapeli	
110 kV – 150 kV, 240 mm <sup>2</sup>	0,07 – 0,15
275 kV, 600 mm <sup>2</sup>	0,04 – 0,1
400 kV, 1000 mm <sup>2</sup>	< 0,05

Suurjännitekaapeleilla vika tapahtuu yleensä kaapelin jälkeisessä osassa eikä itse kaapelissa. Yleensä suurjännitekaapelin reduktiokertoimesta puhuttaessa viitataan juuri tällaiseen tilanteeseen. Mikäli vika tapahtuu itse kaapelissa, on reduktiokertoimen määrittäminen hiukan monimutkaisempaa. Tällöin virran jakautumiseen vaikuttaa muun muassa se, onko läpilyönti jäänyt metallivaippaan vai tullut siitäkin läpi. [28]

## 4.2 Muut reduktiota aiheuttavat tekijät

### 4.2.1 Taajama

Tiheissä asutuskeskuksissa maassa on hyvin paljon johtavia rakenteita, jotka ovat yhteydessä maahan. Näitä ovat muun muassa vesi-, viemäri- ja muut putket sekä sähköjohdot ja rakennukset. Näiden johtavien rakenteiden redusoiva vaikutus esimerkiksi samalla alueella kulkevaan telejohtoon voidaan ottaa huomioon niin sanotulla ympäristön reduktiokertoimella  $k_y$ . Manner-Euroopan suurkaupungeissa saattaa tällaisesta ympäristöstä johtuva reduktiokerroin  $k_y$  olla jopa 0,06...0,18 [29]. Helsingissä on aikoinaan Helsingin kaupungin sähkölaitos mitannut  $k_y$ :lle arvoja 0,15...0,3. [28]

Taajamareduktiokerroin voidaan induktiojännitelaskelmissa ottaa huomioon alueilla, joilla metallisia rakenteita voidaan luotettavasti olettaa olevan. Ehtona on myös, että laskennan kohteena oleva telejohto sijoittuu kokonaan kyseiselle alueelle. VHV-ohjeen mukaan arvona voidaan taajamissa käyttää  $k_y=0,5$  tai Helsingin kaupungin alueella ja muilla vastaavilla alueilla arvoa  $k_y=0,3$ . [25] Taajamareduktiosta on huomioitava, että taajamien metallisia putkiverkostoja korvataan yhä enenevässä määrin johtamattomilla materiaaleilla kuten muoveilla. Tämä johtaa siihen, että taajaman reduktio-ominaisuudet tulevat tulevaisuudessa huononemaan. [24]

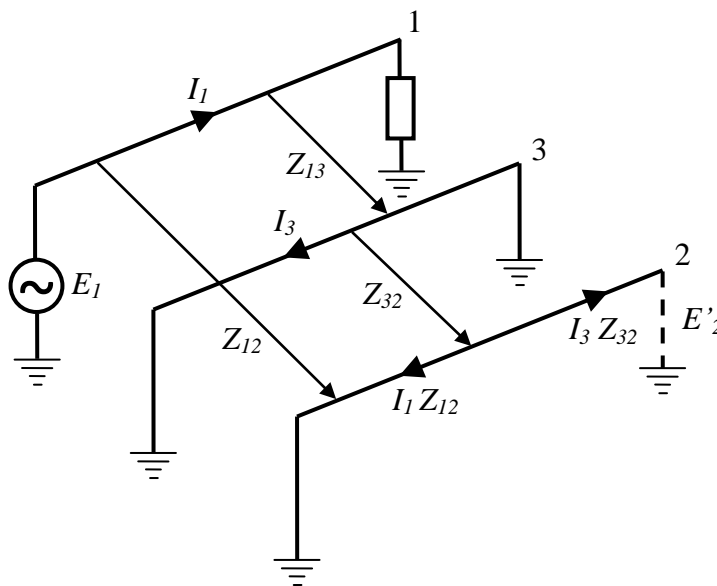
Tilastokeskus määrittelee taajaman rakennusryhmäksi, jossa on vähintään 200 asukasta. Edelleen rakennusten välinen etäisyys ei ole yleensä yli 200 metriä suurempi. Rajaukseen otetaan huomioon asuinrakennusten lisäksi muun muassa liike-, toimisto-, ja muut työpaikkoina käytettävät rakennukset. Hallinnollisilla aluejaoilla ei sen sijaan ole vaikutusta taajamien muodostamiseen. [30] Tätä määritelmää voitaneen käyttää hyväksi arvioitaessa alueen reduktiokerrointa.

#### 4.2.2 Rautatiekiskot

Rautatiet voidaan ottaa tietyissä tilanteissa myös huomioon omalla reduktiokertoimellaan  $k_r$ . Kerroin aiheutuu rautateiden kiskojen redusoivasta vaikutuksesta. Kiskojen tulee olla hyvin maadoitetut, eikä jatkoskohdissa saa olla liikaa ylimenovastusta. Suomessa ehdot täyttyvät sähköradoilla. Jos voima- ja telejohto kulkevat sähköradan lähetyvillä siten, että telejohdon etäisyys siitä on enintään 100 metriä, voidaan induktiolaskelmissa käyttää sähköradan reduktiokertoimena  $k_r=0,7$ . [18][25]

#### 4.2.3 Reduktiojohdin

Telekaapeleiden viereen voidaan laskea erillinen suojalanka eli reduktiojohdin. Tällaisena johtimena toimii esimerkiksi paljas kuparijohdin. Kuvassa 4.3 on esitetty reduktiojohtimen periaatteellinen toiminta. Voimajohdon virta  $I_1$  indusoi reduktiojohtimeen keskinäisimpedanssin  $Z_{13}$  kautta smv:n, joka aiheuttaa reduktiojohtimeen voimajohdon virtaan nähden vastakkaissuuntaisen virran  $I_3$ . Tavallisesti reduktiojohtimen virran  $I_3$  indusoiva vaikutus voimajohdon virtaan on niin mitätön, ettei sitä oteta huomioon. Sen sijaan virta  $I_3$  indusoi telekaapeliin vastakkaissuuntaisen smv:n kuin voimajohto. Tämä pienentää siis telekaapeliin indusoituvaa smv:tä. [28]



**Kuva 4.3.** Reduktiojohtimen (3) vaikutus voimajohdon (1) telekaapeliin (2) indusoimaan sähkömotoriseen voimaan  $I_1 Z_{12}$ . [28]

VHV-ohjeessa annetaan koaksiaalikaapelien kanssa laskettavien suojalankojen (kaksi 3 mm kuparilankaa) reduktiokertoimeksi 0,8. Tällaisia suojalankoja ei enää uusissa asennuksissa käytetä, mutta niitä saattaa silti edelleen jossain olla. Poikkipinnaltaan 25 mm<sup>2</sup> kuparijohtimelle kerroin on 0,65 ja 50 mm<sup>2</sup> johtimelle 0,5. [25] Lähteessä [18] on esitetty kuvaaja, jossa on reduktiokertoimet kuparijohtimelle poikkipinta-alan funktiona etäisyyksillä 5, 20 ja 100 cm telejohdosta.

#### 4.2.4 Telekaapeli ja sen lähellä kulkevat muut telejohdot

Telekaapeleilla itsellään on oma reduktiokertoimensa, joka johtuu sen metallisesta vaipasta. Kun vaippa on maadoitettu riittävän hyvin molemmista päistään, indusoi siinä kulkeva virta itse johtimeen vastakkaisen suuntaisen smv:n kuin voimajohto. Kyse on samasta ilmiöstä kuin reduktiojohtimella. Kaapelilla vaippa toimii siis reduktiojohtimena. Tällöin vaipan ja johtimien välinen jännite jää kaapelin reduktiokertoimen verran pienemmäksi. [31]

Yksittäisen kaapelin tapauksessa reduktiota aiheuttavat myös ne kaapelin parit, jotka on maadoitettu ylijännitesuojien kautta. Suojien toimiessa alkaa johtimissa kulkea virta, joka pienentää indusoituvaa smv:tä samalla tavalla kuin reduktiojohdin. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää hyväksi suurilla kaapeleilla jouduttaessa varustamaan parit ylijännitesuojin. Kaikkia pareja ei tarvitse välttämättä suojata ylijännitesuojin, sillä osan suojista toimiessa pienentävät niiden kautta kulkevat virrat ilman ylijännitesuojia olevien parien smv:tä. [25]

Myös lähellä kulkevat muut telekaapelit pienentävät indusoituvaa smv:tä toisiinsa tietyn reduktiokertoimen mukaisesti. Lähteessä [18] on esitetty reduktiokerroin käyrästä muodossa eri määrälle virrallisia johtimia.

## 5 VAARAJÄNNITEKOhteet

Televerkko on tiedonsiirtomedia, joka pohjautuu hyvin suurelta osin puhelinverkkoon. Puhelin on yleisimmin levinnyt telepalvelu, joka on myös kyennyt rahoittamaan verkon perusrakenteen. Muut palvelut hyödyntävät tätä samaa verkkoa tavalla tai toisella. [32]

Jotta voimajohtojen induktiovaikutuksia televerkkoihin voitaisiin tehokkaasti arvioida, tulee tietää, kuinka televerkko on rakentunut. Myös käytettävien johtimien tunteminen on välttämätöntä. Maadoitus- ja suojauspaikkojen tietäminen suurpiirteisesti on eduksi arvioitaessa syntyviä maadoitusjännitteitä. Historiallinen katsaus menneisyyteen on myös jossain määrin tarpeen, sillä Suomessa on edelleen käytössä myös vanhaa tekniikkaa. Myös tulevaisuuden kehityssuuntien tunteminen on tärkeää, että osataan varautua tulevaan. Induktiovaarajännitteiden kannalta keskeinen osa puhelinverkkoa on keskusalue, jossa tilaajat yhdistetään operaattorin keskusalueen keskitintilaan kuparisilla tilaajajohdoilla. Keskusalueita kutsutaan usein myös keskitinalueiksi.

Telejohdot eivät ole ainoita, joihin voimajohdot indusoivat vaarallisia jännitteitä. Voimajohdot vaikuttavat myös kaikkiin muihin johtaviin rakenteisiin niiden lähistöllä. Näitä ovat muun muassa metalliset kaasuputket ja aidat. Myös voimajohdon vieressä kulkevaan toiseen voimajohtoon indusoituu jännitteitä. Tämä on huomioitava erityisesti viereisellä johdolla tehtävissä töissä.

Tilanteissa, joissa johtava pitkä rakenne on voimajohdon lähellä ilman suojaavaa johtavaa vaippaa, vaikuttaa siihen induktion lisäksi myös kapasitiivinen kytkäytyminen. Induktio vaatii usein pidemmän yhdensuuntaisen altistumisen, kun taas kapasitiivinen kytkäytyminen on yhdensuuntaisen etäisyyden lisäksi riippuvainen jännitteestä ja aiheuttaa vaarajännitteitä jo huomattavasti lyhyemmälläkin matkoilla.

### 5.1 Televerkko

#### 5.1.1 Rakenne ennen, nyt ja tulevaisuudessa

Puhelinverkkojen kehittyminen alkoi heti puhelinkoneen keksimisen jälkeen vuonna 1876. Puhelinverkko muodostuu puhelinkeskuksista eli keskittimistä ja niiden välisistä yhdysjohdoista. Jo alussa puhelinverkko rakennettiin säteittäiseksi eli tähtimäiseksi. Tällöin keskukselta lähtee oma johto jokaiselle käyttäjälle eli tilaajalle. Keskukselta tilaajalle kulkevaa johtoa kutsutaan tilaajajohdoksi. [33]

Puhelinverkon ensimmäiset siirtotiet rakennettiin pylväslinjoina avojohtoja ja 2–3 mm teräslankoja käyttäen. Avojohtolla tarkoitetaan erillisistä, eristimille asennetuista vaipattomista johtimista muodostettua paria. Aluksi yhteydet olivat yksilankaisia, sillä paluuyhteytenä käytettiin kustannusten säästämiseksi maata. Kaksijohtimiset yhteydet

tulivat Suomessa käyttöön vuonna 1897, ja samalla siirryttiin käyttämään teräslankojen asemasta kuparilankoja. Paremman johtavuuden vuoksi lankojen poikkipinnat pienenevät ja siirtoetäisyydet kasvoivat. Avojohtoja käytetään nykyään enää hyvin harvoin harvaanasutuilla seuduilla. [33]

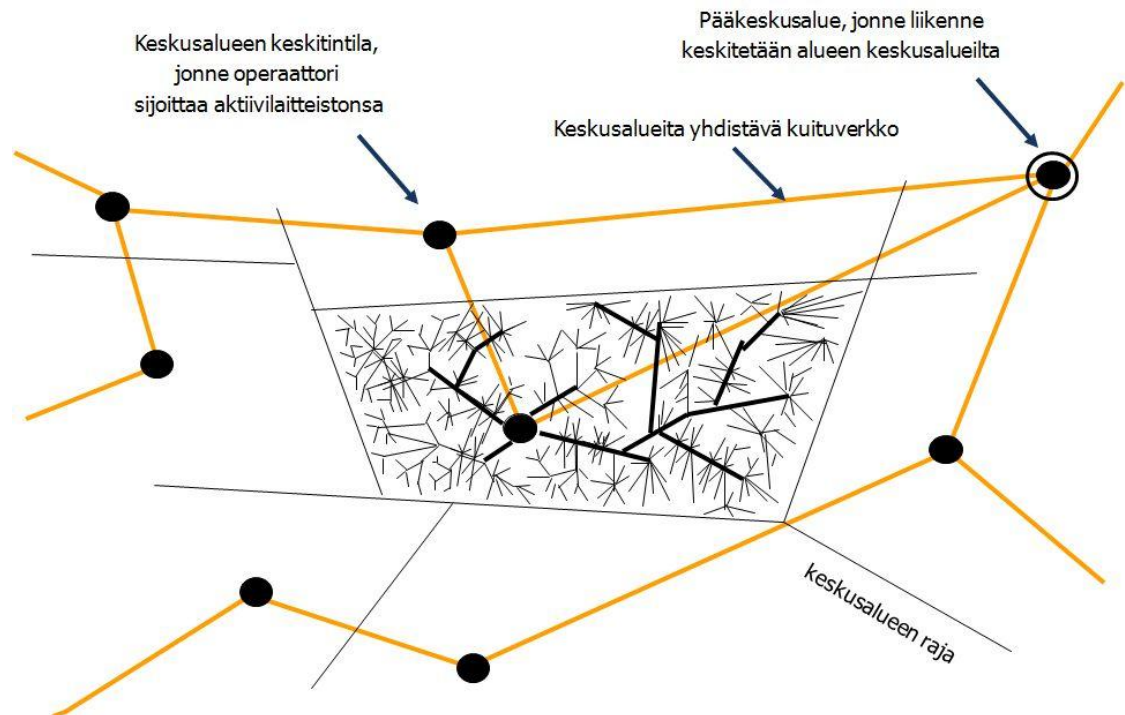
Ilma- ja maakaapeleiden käyttö alkoi Suomessa 1900-luvun alussa. Kaapelit voidaan jakaa niiden asennuspaikan mukaan ilma-, maa-, kanava-, vesi- ja sisäkaapeleihin. Käytötarkoituksen mukaan kaapelit jaetaan kauko-, verkkoryhmä- ja paikalliskaapeleihin. Tilaajakaapeleina käytettävien paikalliskaapeleiden johtimien nimellishalkaisijat ovat 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm ja 0,8 mm. [33]

Ensimmäisissä kaapeleissa johtimet kierrettiin loivasti pareiksi ja ympäröitiin ohuella paperilla. Lopuksi kaapelin ympärille puristettiin saumaton lyijyvaippa. Tällaisia symmetrisiä kaapeleita käytettiin 1950-luvulle saakka. Nykyisissä kaapeleissa vaippana käytetään alumiinia ja muovia. Myös paperieriste on korvautunut muovilla. [33]

Valokaapeli otettiin Suomessa ensimmäisen kerran käyttöön vuonna 1979, jonka jälkeen 1980-luvulla valokaapelin käyttö laajeni runko- ja yhdysverkkojen sovelluksista rakennusten väliseen kaapelointiin ja saman vuosikymmenen lopulla myös rakennusten nousukaapelointiin. 1990-luvulla keskityttiin tilaajaverkon rakentamiseen ja kehittämiseen. Valokaapeliyhteyksiä rakennettiin jatkuvasti lisää ja vanhoja parikaapeleita ja koaksiaalikaapeleita korvattiin optisilla kuiduilla. 2000-luku on ollut nopeata kasvun ja tilaajaverkkojen rakentamisen aikaa. Vähitellen optinen kuitu on sen kustannusten lasiessa ja saatavuuden parantuessa noussut ykkösvaihtoehdoksi uutta tietoliikenneinfrastruktuuria rakennettaessa. Myös tulevaisuuden jatkuvasti kasvavat tarpeet tiedon siirrolle ohjaavat operaattoreita, kuntia ja kaupunkia valitsemaan tietoverkkojen materiaaliksi optisen kuidun. [34] Vuonna 2002 Suomessa noin 85 % puhelinverkon keskusalueita yhdistävistä yhdysjohdoista oli toteutettu valokaapelilla [35].

Tietyllä teleliikennealueella tai kaupunkialueella hallitsevan markkinavoiman asemassa oleva operaattori omistaa alueen tilaajajohdot eli niin sanotun pääsyverkon. Tilaajajohdot kuvataan haaroittuvana verkkona, joka kuvaa kupariverkon käyttöä kiinteistöltä alkavana alueverkkona, jonka avulla yhteydet kootaan keskusalueen keskitintilaan. Verkko haarautuu pääsyverkon ristikytkeäpisteissä, jotka sijaitsevat tyypillisesti alueen kiinteistöjen puhelinjakamoissa tai tienvarsilla tai muissa sellaisissa olevissa jakamokaapeissa. Keskusalueen rakenne on kuvattu kuvaan 5.1. [36]





**Kuva 5.1.** Puhelinverkon fyysinen rakenne: keskusalue, tilaajajohdot ja keskusalueita yhdistävä kuituverkko. Tilaajajohdot on piirretty kuvaan keskittimeltä alkavana haaroittuvana verkkona. [36]

Tilaajajohdot rajoittuvat käytännössä aina keskusalueen rajojen sisäpuolelle. Ei ole kuitenkaan poissuljettua, ettei jokin yksittäinen kuparijohto kulkisi rajojen yli viereiselle keskusalueelle. Tällaisia tapauksia tiedetään olevan joitakin. Eri operaattoreiden valokaapeliyhteyksiä sen sijaan kulkee keskusalueiden rajojen yli. [37]

Keskusalueen kokoa rajoittaa kupariparin tiedonsiirtokyky verkon rakennusaikana. Keskusalueiden verkkoja rakennettaessa käytössä oli perinteinen analoginen puhelin-tekniikka, joka rajoitti tilaajajohdon pituutta tekniikasta, verkon rakenteesta ja kaapeli-tyypistä riippuen n. 20 kilometriin. [36]

Puhelinverkko on rakenteeltaan hierarkkinen, jossa tilaajia voidaan liittää pääte-, solmu- ja aluekeskuksiin. Päätekeskukset liittyvät yhdysjohdoilla solmukeskuksiin ja nämä puolestaan aluekeskuksiin. Vaikka rakenne periaatteessa on tähtimäinen ja hierarkkinen, voi solmukeskusten välillä olla myös oikojohdot tai poikittaisjohtoja.

Joukko alimman tason päätekeskuksia, keskittimiä, liittyy säteittäisesti yhteen solmukeskukseen. Solmukeskukset liittyvät puolestaan yhteen verkkoryhmäkeskukseen. Viimeisenä hierarkiassa tulevat kaukokeskukset, kauttakulkukeskukset ja kansainvälisen liikenteen keskus. Keskusten välisiä johtoja kutsutaan yleisesti yhdysjohdoiksi. Mikäli niitä halutaan tarkemmin yksilöidä, voidaan saman verkkoryhmän paikalliskeskusten välisiä johtoja kutsua verkkoryhmäjohdoiksi, kaukokeskuksen ja saman verkkoryhmän paikalliskeskusten välisiä johtoja välitysjohtojiksi, kaukokeskusten välisiä johtoja kaukojohdoiksi ja kansainvälisen liikenteen keskusten välisiä johtoja kansainvälisiksi johdoiksi. [33][36]

Nykyään uutta televerkkoa rakennetaan useimmiten valokuidulla. Ensimmäinen vaihe on ollut vaihtaa kupariset yhdysjohdot valokuiduksi. Nyt kun ne ovat käytännössä vaihdettu, on siirrytty vaihtamaan vanhoja kuparisia tilaajajohtoja valokuituun. Joitain kohteita kuitenkin yhä saneerataan myös kuparilla. Vanhoissa kupariyhteyksissä ongelmana on kuitenkin se, että tiedonsiirron yhä kasvaessa ei vanhojen kuparikaapeleiden kapasiteetti riitä. Etenkin tämä on ongelmana pitkällä yhteyksillä. Uudiskohteet rakennetaan nykyään lähes poikkeuksetta valokuidulla. Tulevaisuudessa kuparin määrä televerkoissa tulee siis koko ajan laskemaan. [37]

### 5.1.2 Maadoittaminen ja suojaaminen

Viestintäviraston määräyksessä 43D/2010M määrätään viestintäverkon maadoittamisesta ja perussuojauksesta, joka on vähintään tehtävä ilmastollista alkuperää olevilta yli-jännitteiltä ja -virroilta. Määräyksen perusteella viestintäverkko on maadoitettava standardien SFS 5719 ja SFS 6000-5-54 mukaisesti. Maadoitus on tehtävä metalliosia sisältävälle siirtotielle, teleasemalle sekä aktiivisia viestintäverkon laitteita sisältävälle laitekaapille. Jos maadoitin kuuluu voimajohdosta konduktiivisesti, kapasitiivisesti tai induktiivisesti muodostuvan jännitteen torjumiseksi tarkoitettuihin suojaustoimenpiteisiin, on maadoitin suunniteltava tapauskohtaisesti. [23]

Standardin 5719 mukaan maadoittimena on oltava vähintään 20 metrin pituinen maadoituselektrodi joko säteittäisenä tai renkaaksi asennettuna. Maadoituselektrodi asennetaan vaakaan routarajan alapuolelle, kuitenkin harvoin syvemmälle kuin 0,7 metriä. Tietyissä tilanteissa se voidaan korvata myös pystymaadoituksella. Materiaalina tulee käyttää vähintään  $16 \text{ mm}^2$  kuparia tai  $35 \text{ mm}^2$  ruostumatonta tai kuumasinkittyä terästä. Maadoitukset tulee standardin mukaan tarkastaa maadoitusresistanssin mittamisella. Mittaustulos on merkittävä muistiin. [38]

Mikäli verkonhaltijalla ei resistanssiarvoja ole, voidaan induktiolaskelmissa hyödyntää maadoitusjännitteen laskemiseen standardin SFS 6001 liitteen K mukaista laskennallista arvoa maahan vaakasuoraan upotetulle 20 metrin mittaiselle maadoituselektrodille. Maan ominaisresistiivisyytenä voidaan laskelmissa käyttää  $2300 \Omega\text{m}$  tai mikäli maadoitin on voimajohdon lähettyvillä, voidaan käyttää voimajohdon maadoitusmittausten yhteydessä mitattua arvoa maan ominaisresistiivisyydelle.

Määräyksen 43D/2010M mukaan metallijohtimisista kaapeleista, koaksiaalikaapeleista tai valokaapeleista muodostuvat siirtotiet on perussuojattava ilmastollista alkuperää olevilta yli-jännitteiltä ja -virroilta. Kaapelien metallivaippa on yhdistettävä maadoitukseen teleasemalla, viestintäverkon laitteita sisältävässä laitekaapissa ja maahan tai kosketusetäisyydelle maasta sijoitetussa muussa laitekaapissa. Jatkoksissa ja laitekaapeissa, joissa kaapeleiden metallivaippaa ei tarvitse maadoittaa, tulee kaapeleiden metallivaipat yhdistää toisiinsa. Kiinteän viestintäverkon liityntäverkon kaapelin metallivaippa on maadoitettava verkon haarojen päissä tai korkeintaan 300 metrin etäisyydellä niistä. [23]

Perussuojaukseen käytetään ITU-T K.12 mukaisia kaasupurkausyli-jännitesuojia tai suojausominaisuuksiltaan vastaavia suojia. Metallivaippa ja yli-jännitesuojat on yhdistet-

tävä maadoittimeen. Mikäli kiinteän viestintäverkon liityntäverkon metallivaippaisen kaapelin päätteeseen liittyy yksikin yli 300 metriä pitkä metallivaipaton ulkokaapeli, päätteen kaikki parit on varustettava ylijännitesuojin. Myös jos kyseessä on salamalle altis talokaapeli, täytyy talopäätteessä kaikki käytössä olevat johtimet varustaa johtimien ja maadoituksen välisillä ylijännitesuojilla. [23]

### 5.1.3 Käytettävät johtimet

Tilaajaverkossa käytettävät kupariset puhelinjohdot ovat suuria keskittimien lähellä ja pieniä lähellä asiakasta. Jokaiselle tilaajalle tulee keskitinalueella oma johtonsa keskitimeltä. Tämä johto koostuu kahdesta johdinlangasta, joista toinen on paluujohdin. Tätä rakennetta kutsutaan pariksi. Keskittimeltä lähtee keskusalueelle tyypillisesti useita usean sadan parin kaapeleita. Jakamoissa tällainen iso kaapeli haaroitetaan useammaksi pienemmäksi kaapeliksi. Lopulta kaapeli on haaroitettu vain 1–3 pariksi, jotka menevät tilaajille.

Keskittimeltä lähtevät tilaajajohdot ovat tyypillisesti VMOHBU-kaapelia (kuva 5.2). Tällaisessa kaapelissa voi pareja olla kolmesta jopa 800:aan. Eristyksenä käytetään vaahdotettua PE-muovia. Suojavaippana käytetään alumiinia ja päällimmäisenä vaippana on musta PE-muovi. [39] Tyypillisesti kaapeleiden testijännitteet ovat johtimen ja suojavaipan välissä 2000 V ja johtimien välillä 500 V. Suojavaipan ja maan välinen jännitekestoisuus voi mekaanisten vaatimusten takia saavuttaa jopa 100 kV jännitekestoisuuden. [40] Kyseisessä lähteessä ei mainita mitä jännitemuotoa kyseinen jännitekestoisuus edustaa. Käytännössä eristepaksuudesta johtuen jännitekestoisuus lienee kuitenkin ac-muotoisella jännitteellä useita kymmeniä kilovoltteja.

Kaapeli asennetaan yleensä maan alle, mutta myös erityistä ilmakaapelia voidaan käyttää. Tällöin on kyseessä kannatusköydellinen kaapeli eli VMOHBUK (kuva 5.3). Viimeisenä lenkinä ketjussa on tilaajalle menevä liityntä-/talokaapeli, joka voi olla esimerkiksi yksiparinen MU-kaapeli (kuva 5.4). MU-kaapelissa ei ole erillistä suojavaippaa sähkömagneettisia kenttiä vastaan, eikä sitä enää ole asennettu uusiin kohteisiin. [39] Nykyään liityntä-/talokaapelina käytetään pylväsasennukseen MHBUS (Kuva 5.5) ja kaapeliasennukseen muutaman parin VMOHBU kaapeleita. [37]



**Kuva 5.2.** VMOHBU-kaapeli. Kaapelissa on pareja muutamasta satoihin. [39]



**Kuva 5.3.** VMOHBUK-kaapeli. Kaapelissa teräksinen kannatusvaihjeri. [39]



**Kuva 5.4.** Yksiparinen MU-kaapeli. [39]



**Kuva 5.5.** Neljäparinen MHBV-kaapeli ilma-asennuksiin. [39]

### Johtimien reduktiokertoimet

Telekaapelin vaipan ollessa maadoitettu molemmista päistä tapahtuu samanlainen ilmiö kuin reduktiojohtimen tapauksessa. Vaippaan indusoituneen smv:n aikaansaama virta indusoi telekaapelin johtimiin voimajohdon indusoimaa smv:tä vastakkaissuuntaisen smv:n. Tällöin vaipan ja johtimien välinen jännite on telekaapelin reduktiokertoimen  $k_t$  verran pienempi verrattuna tilanteeseen, jossa vaippaa ei olisi ollenkaan. [31] Tästä syystä avojohdot ovat herkempiä induktiojännitteille kuin kaapelit. Myös MU-kaapelin reduktiokerroin on 1.

Telekaapeleiden reduktiokertoimet saadaan käytännössä kaapelivalmistajilta. Lähteessä [10] kuitenkin annetaan joitain yleisiä arvoja tietyn tyyppisille johtimille. Näitä reduktiokertoimia on lueteltu taulukkoon 5.1.

**Taulukko 5.1.** Telekaapeleiden reduktiokertoimien suuruusluokat. [10]

Lyijyvaippainen kaapeli	reduktiokerroin
halkaisija 20 mm	0,85–0,95
halkaisija 40 mm	0,6–0,85
alumiinivaippainen kaapeli	
halkaisija 20 mm	0,2–0,6
halkaisija 40 mm	0,1–0,4

#### 5.1.4 Televerkkoon indusoituvat jännitteet

Voimajohdon induktiovaikutusalue vaihtelee huomattavasti. Kuten toisessa luvussa todettiin, on Suomi hyvin poikkeuksellinen alue voimajohtojen induktiovaarajännitteiden kannalta. Lähteessä [10] mainitaan, että induktiotarkastelu tulisi tehdä telejohtoille, jotka ovat alle kolmen kilometrin etäisyydellä voimajohdosta. Tällä tarkoitetaan kuitenkin tilannetta, jossa maan ominaisresistiivisyys vastaa keskieuropalaisia olosuhteita ja

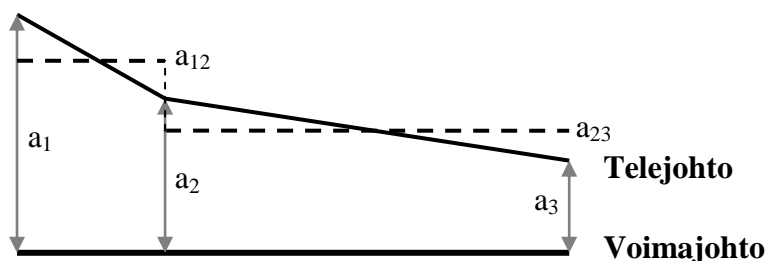
mikäli maan ominaisresistiivisyys on poikkeuksellisen korkea, tulee vastaavasti käyttää suurempaa tarkasteluetäisyyttä. [10]

Lähteessä [24] mainitaan eri maan ominaisresistiivisyyksille olevia induktiovaikutusalueita. Interpoloimalla näiden arvojen välistä saadaan Suomen olosuhteisiin vaikutusalueeksi noin 10 kilometriä voimajohdon molemmin puolin. On kuitenkin huomattava, että indusoitumista tapahtuu myös tätä etäisyyttä kauempana. Kuitenkin pienestä keskinäisimpedanssista johtuen vaarallisen tai haitallisen smv:n indusoituminen on erittäin epätodennäköistä käytettävien telejohtojen pituuksien takia. Taajamissa tarkastettava alue on ympäristön reduktiosta johtuen vain noin neljännes [24].

Telejohtoon indusoituneen smv:n arvioimiseen tarvitaan yhtälön (5) mukaisesti käytännössä indusoiva virta sekä voimajohdon ja telejohdon välinen keskinäisimpedanssi. Tyypillisesti keskinäisimpedanssi saadaan pituuteen suhteutettuna eri etäisyyksille voimajohdosta. Näin ollen sen yksikkönä on V/km. Koska taajuus ja maan ominaisresistiivisyys ovat käytännössä aina samat, näitä samoja keskinäisimpedanssin arvoja pituusyksikköä kohti voidaan käyttää aina. Tällöin tietyn etäisyyden keskinäisimpedanssiarvot kerrotaan altistuspuiteudella  $l$ .

Altistuspuite on telejohdon kohtisuora projektio voimajohdolle. Jos telejohto kulkee voimajohtoon nähden takaisinpäin, tulee tämä matka ottaa huomioon negatiivisena arvona. [10] Näin ollen takaisinpäin palaavaan telejohtoon indusoituva smv pienentää kokonais-smv:tä.

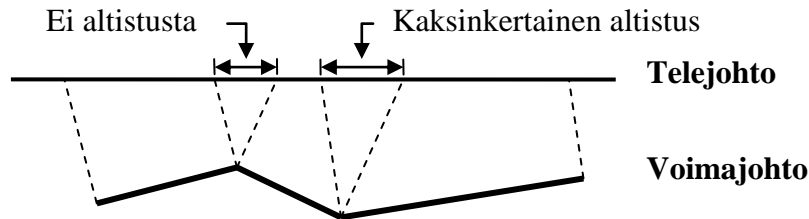
Telejohto voi olla voimajohtoon nähden joko yhdensuuntainen, kohtisuora tai jossain tietyssä kulmassa näiden väliltä. Yhdensuuntaisen johdon tapauksessa indusoituneen smv:n laskeminen on yksinkertaista, sillä johdon pituus ja etäisyys voimajohdosta on helppo määrittää. Mikäli johto on voimajohtoon nähden kohtisuorassa, ei induktiovaikutusta synny. Vinoissa altituksissa indusoituva smv voidaan laskea jakamalla vino telejohto voimajohdon kanssa yhdensuuntaisiin osaprojektioihin (kuva 5.6). Osaprojektioiden etäisyys voimajohdosta on sen päätepisteiden geometrinen keskietäisyys. Tällöin esimerkiksi kuvan 5.6 tapauksessa  $a_{12} = \sqrt{a_1 a_2}$ . Yhdensuuntaisten osien pituudet tulee valita siten, että osan maksimietäisyys  $a_1$  ei ylitä kolminkertaista minimietäisyyttä  $a_2$  voimajohdosta. [10]



**Kuva 5.6.** Vinon telejohdon korvaaminen voimajohdon kanssa yhdensuuntaisilla osuuksilla.

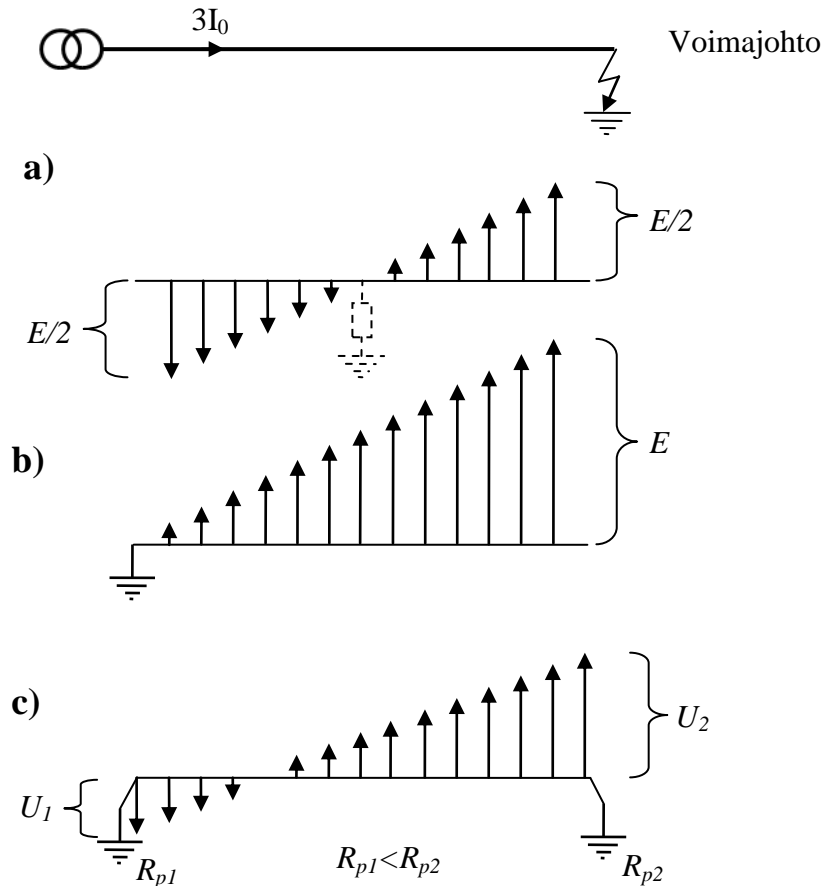
Voimajohdon tehdessä mutkia voidaan induktiovaikutus tietylle telejohdon kohdalle jättää laskematta tai se täytyy laskea kahteen kertaan. Laskenta riippuu kuvan 5.7 mu-

kaan siitä, onko telejohto voimajohdon mutkan sisä- vai ulkopuolella. Telejohdon projektiot voimajohdon tietynsuuntaisille osuuksille menevät mutkan sisäpuolella osittain päällekkäin ja ulkopuolella väliin jää alue, joka ei kuulu voimajohdon mutkan kummallekaan puolelle tehtävään projektioon. [10]



**Kuva 5.7.** *Smv:n laskenta voimajohdon tehdessä mutkan.*

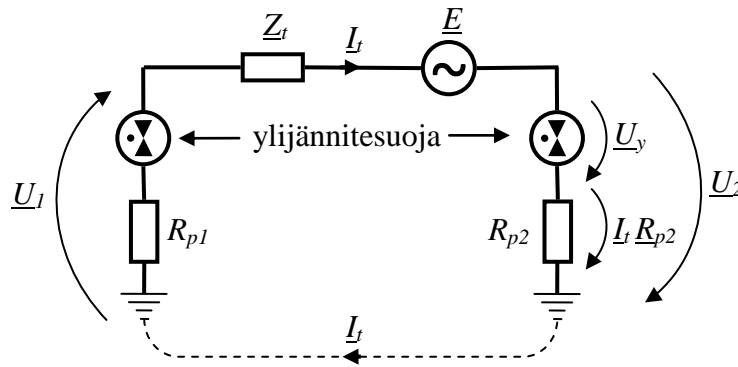
Telejohdon eri johtimiin indusoituu käytännössä sama smv niiden keskinäisen läheisyyden takia. Indusoituva smv on niin sanotusti pitkittäinen, eikä se sinällään edusta jännitettä johtimen ja maan välillä. Pitkittäinen smv on käytännössä johdon pituussuunnassa sen päiden välinen potentiaaliero. Maahan nähden jännite voi johdon varrella siis saada hyvinkin erilaisia arvoja. Jos telejohto on täysin eristettynä maasta ja se on koko matkalta yhdensuuntainen voimajohdon kanssa, voidaan sen maakapasitanssi ja vuoto-konduktanssi keskittää keskikohtaan. Näin ollen telejohto voidaan ajatella maadoitetuksi keskeltä. Tällöin jännite johdon päissä on puolet koko johdon smv:stä, ja keskellä se on nolla (kuva 5.8a). Kuitenkin kosketettaessa johdon päätä siitä saatava jännite on pienempi kuin  $E/2$ , sillä kehon vastus on useimmiten pieni johdon maakapasitanssiin ja vuotojohtokyvyn edustamaan impedanssiin verrattuna. [19]



**Kuva 5.8.** Telejohdon jänniteprofiili erilaisissa maadoitustilanteissa.

Mikäli telejohto maadoitetaan toisesta päästä, muuttuu jännitekuvio kuvan 5.8b mukaiseksi, jolloin jännite johdon avoimessa päässä on koko indusoituneen smv:n suurinen. Tällainen tilanne syntyy esimerkiksi, jos ylijännitesuojat syttyvät vain telejohdon toisessa päässä. Tämä tilanne on myös pahin mahdollinen ja näin ollen induktiotarkastelun kannalta rajoittavin. Kuvan 5.8c tilanne edustaa tapausta, jossa telejohto on maadoitettu molemmista päistään. Tilannetta edustaa kuvan 5.9 piirikytkentä. Tällöin telejohdossa alkaa kulkea smv:n aikaansaama virta  $I_t$ , joka maadoitusten  $R_{p1}$  ja  $R_{p2}$  kautta maahan kulkiessaan aiheuttaa suoraan maadoitusresistanssiin verrannollisen jännitteen. [19]

Jännitekuvio muuttuu käyräviivaiseksi tilanteissa, joissa telejohdon etäisyys voimajohdosta vaihtelee.



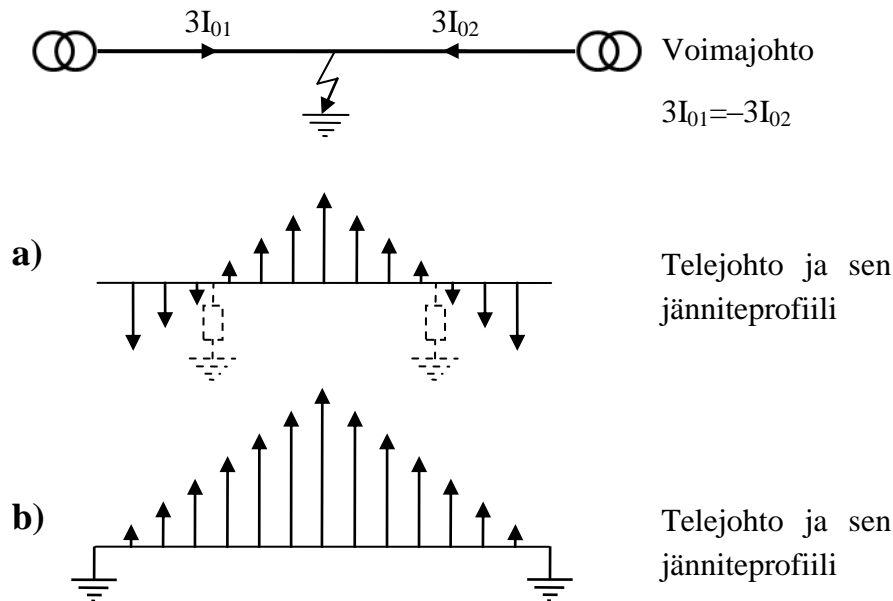
**Kuva 5.9.** Kuvan 5.8c jänniteprofiilin periaatteellinen kytkentä. Smv  $E$  saa telejohdossa aikaan ylijännitesuojien lauettua virran  $I_b$ , joka aiheuttaa maadoitusjännitteen  $U_1$  ja  $U_2$ . Ylijännitesuojan jäännösjännitettä merkitään  $U_y$ . [19]

Mikäli telejohdolla on useita välisuojaapaikkoja, tulevat tarkat jännitelaskelmat monimutkaisimmiksi. Tilannetta voidaan kuitenkin arvioida siten, että jätetään välisuoja-paikat huomioimatta ja arvioidaan koko johtoa yhtenä osuutena. Merkitsemällä toisen pään maadoitusvastus nollassi pysytään arvioinnissa varmallalla puolella. [19]

Jännite on siis maasulkutilanteissa suurin telejohtoon päissä. Päätelaitteiden suojaamiseksi riittääkin usein vain johdon päihin asennetut ylijännitesuojat maasulkupaikasta riippumatta, mikäli nämä vain ovat kunnossa.

Telejohtoon keskipaikkeilla sattuvan maasulun, jossa molemmista suunnista syötetään yhtä suurta virtaa, aiheuttama jänniteprofiili on kuvassa 5.10. Mikäli telejohto on eristetty, tilanne on kuvan 5.10a mukainen, ja jos telejohto on maadoitettu molemmista päistä, on se 5.10b mukainen. Maasulku telejohtoon puolivälin paikkeilla ei siis aiheuta johdon päissä oleville päätelaitteille mitään ongelmaa. Jännite maahan nähden on alle 50 % verrattuna koko johdon smv:hen maasulun sattuessa yhdensuuntaisen osuuden ulkopuolella. Toisaalta, jos kyseessä on esimerkiksi kahden välisuojaapaikan välinen osuus, jännitettä nostavat naapuriosuuksien aiheuttamat maadoitusjännitteet kyseessä olevissa välisuojaapaikoissa. Tällöin kuvan 5.10b jänniteprofiili ei ala nolasta vaan ylempää. Todennäköisyyksien kannalta lyhyen osuuden keskipaikkeille osuva maasulku on epätodennäköistä. [19]





**Kuva 5.10.** Jänniteprofiilit eri maadoitustilanteissa, kun maasulku tapahtuu telejohdon keskipaikkeilla. [19]

On muistettava, että vikatilannetta ja normaalikäytön aikaista induktiovaikutusta arvioitaessa ja laskettaessa tulee keskinäisimpedanssille käyttää 50 Hz arvoja. Mikäli halutaan laskea erilaisten normaalikäytön aikaisten hajavirtojen, esimerkiksi maan kautta kiertävien kolmansien yliaaltojen vaikutusta, tulee käyttää asianmukaiselle taajuudelle laskettuja keskinäisimpedanssiarvoja.

### 5.1.5 Vaikutukset

Induktiivisen kytketymisen vaikutukset voidaan telelaitteistoissa jakaa kolmeen luokkaan: vaarallisiin, vahingollisiin ja häiritseviin. Tilanne luokitellaan vaaralliseksi, kun häiriö voi aiheuttaa telelaitteistoon kosketuksissa olevalle henkilölle vaaratilanteen. Toisin sanoen laitteistosta aiheutuu työntekijälle tai sivulliselle henkilölle sähköiskun vaara. Jännitteen ja virran suuruus vaikuttavat siihen, miten sähkö ihmiseen vaikuttaa. Vaikka virta on periaatteessa vaarattoman pieni, saattaa se aiheuttaa vaaratilanteen välillisesti. Sähköiskun saanut henkilö voi esimerkiksi säikähtäessään pudota jostain. [3] Televerkkoon kytkeytyvät jännitteet eivät aiheuta maallikoille juurikaan vaaraa, sillä esimerkiksi kotitalouksissa olevat lankapuhelimet ovat suojaeristettyjä.

Vahingollinen tilanne määritellään pysyvää laadun heikkenemistä aiheuttavaksi vahingoksi. Tilanne ilmenee, kun indusoituva smv on riittävän suuri, että sen aiheuttama jännite ja virta kykenevät aiheuttamaan pysyvää vahinkoa telelaitteistolle siten, että toiminnan jatkaminen vaatii manuaalisen korjaamisen. Toisin sanoen indusoivan vaikutuksen poistuessa vika ei poistu telelaitteistosta. [3]

Vika voi ilmetä lämpövauriona laitteistossa tai kaapeleissa. Lämpö aiheutuu, kun telelaitteistossa kulkee suuria virtoja. Lämpö voi sulattaa eristeitä ja aiheuttaa laitteiston

sisäisiä oikosulkuja. Myös liian suuret jännitteet voivat aiheuttaa telelaitteistoissa sisäisiä läpilyöntejä. Lämpö aiheuttaa myös tulipaloriskin. [3]

Valokaapeleissa liian suuret virrat metallivaipassa voivat polttaa valokuituja käyttökelvottomiksi. Tällaisia virtoja tuskin aiheutuu induktion kautta. Sen sijaan ukkosella salaman tiedetään aiheuttaneen tämän kaltaisia vahinkoja. [37]

Koska tilaajajohdot ovat kuparisia ja siirtävät analogista signaalia, ne ovat hyvin herkkiä erilaisille häiriöille. Valokaapeleiden osalta tilanne on huomattavasti parempi, koska sähkömagneettiset kentät eivät niiden tiedonsiirtoon vaikuta. Häiriintymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa telelaitteistoon aiheutuu kohinaa tai laitteet eivät toimi kuten pitäisi. Tällöin indusoitunut jännite on riittävän suuri aiheuttamaan telelaitteiston suorituskyvyn alenemista. Tämä ilmenee esimerkiksi kohinana, signaalien vääristymisenä, digitaalisen tiedonsiirron virheinä ja muina virhetilanteina. Häiriöt ovat luonteeltaan sellaisia, että ne poistuvat, kun niiden aiheuttajakin poistuu. Näin ollen ei jälkeensä tarvita korjaavia toimenpiteitä. [3]

## 5.2 Maakaasuputket

Maakaasuputket ovat pitkiä sähköisesti johtavia rakenteita, joihin voimajohdot voivat indusoida smv:n samalla tavalla kuin kuparisiin telejohtoihin. Maakaasuputket altistuvat myös kapasitiivisille ja konduktiivisille vaarajännitteille, mutta niiden vaikutus jää useimmiten pieneksi. Kapasitiivisen kytkeytymisen haitalliset vaikutukset estetään sijoittamalla kaasuputket maan alle ja konduktiiviset vaarajännitteet sijoittamalla kaasuputki ja voimajohdon pylväs maadoituksineen riittävän etäälle toisistaan [2]. Vaadittavat etäisyydet määritellään standardissa SFS 5717 [41]. Muualla kuin Suomessa saatetaan voimajohto ja maakaasuputki sijoittaa myös samalle johtokadulle maan pinnan yläpuolelle.

### 5.2.1 Suomen maakaasuverkosto

Suomessa maakaasuverkko sijoittuu Kaakkois- ja Etelä-Suomeen. Suomen maakaasun siirtoverkon omistaa Gasum Oy. Verkko rakentuu siten, että siirtomäärältään isoimmista siirtoputkissa kaasua siirretään korkeammassa paineessa (30–54 bar, uusissa putkissa jopa 80 bar) ja halkaisijaltaan suuremmilla putkilla. Paineenvähennysasemilla kaasun paine lasketaan asiakkaalle sopivaksi. Niistä kaasua siirretään eteenpäin jakeluverkossa, jossa putkikoko ja paine ovat pienempiä. [42]

Maakaasuputkiston tekniset vaatimukset ovat siirron ja jakelun osalta määritelty Valtioneuvoston asetuksessa maakaasun käsittelyn turvallisuudesta [43]. Suomessa siirtoverkon putket ovat teräsputkia, jotka on pinnoitettu korroosion estämiseksi polyeteenimuovilla. Edellä mainitussa asetuksessa pinnoitteen paksuudeksi määrätään vähintään 1,8 mm. Lisäksi pinnoitteen eheys tulee tarkastaa sähköisellä läpilyöntikojella rakennusvaiheessa ennen putken peittämistä. Siirtoverkon putket asennetaan 1-2 metrin syvyyteen maan alle ja merkitään maan päällä merkintäpaaluilla.

Siirtoverkossa teräsputkien korroosiosuojana käytetään polyeteenipinnoitteen lisäksi tavanomaisesti katodista suojausjärjestelmää. Tämän tehtävänä on ehkäistä putken ulkopuolinen syöpyminen kohdissa, joissa putken pinnoite on päässyt jostain syystä vaurioitumaan. Katodinen suojaus on sähköinen korroosionestomenetelmä, jossa ulkoisella virtalähteellä syötetään maahan kaivettujen anodien kautta virtaa putkilinjaan. [44] Anodit sijaitsevat erillisillä noin hehtaarin kokoisilla anodikentillä, jotka ovat tyypillisesti savimaassa parin sadan metrin päässä kaasuputkesta [45][46]. Anodikentistä maan kautta putkilinjaan syötetyllä virralla pakotetaan virta kulkemaan päinvastaiseen suuntaan kuin korroosiotilanteessa. Riittävällä virrantiheydellä korroosio putken vauriokohdassa estyy. [44] Järjestelmän eri osat ovat virtapiirin osana toimiva kaasuputkisto, jännitelähteet, anodikentät sekä näitä yhdistävät kaapelit. [41]

Siirtoverkosta maakaasu johdetaan jakeluverkkoon paineenvähennysasemien kautta. Gasumin jakeluverkkojen putkisto on pääosin muovista (polyeteeniä), mutta Helsingin kaupungin alueella on kuitenkin noin 80 kilometriä jakeluputkistoa, jonka materiaalina ovat teräs ja valurauta. [47]

Suomen teräksisen siirtoputkiston pituus on noin 1187 km. Havainnollistava kuva kaasuverkosta löytyy liitteestä 4, joka on saatu Gasum Oy:n verkkosivuilta. Jakeluputkiston pituus Suomessa on noin 1805 km, josta muovista putkea on 1700 km. Jakeluverkosto jakautuu Gasum Oy:lle ja paikallisille jakeluyhtiöille. [48] Vaarajännitetarkasteluissa tulee aina olla yhteydessä Gasum Oy:hyn tai paikalliseen jakeluyhtiöön tarkan kaasuputken sijainnin ja laadun selvittämiseksi, mikäli sellaisen tiedetään risteävän tai olevan lähellä voimajohtoa.

## 5.2.2 Maakaasuputkistoon indusoituvat jännitteet

Pääperiaatteet sähkömotorisen voiman indusoitumisesta kaasuputkeen ovat samat kuin telejohtoon tai mihin muuhun tahansa pitkään johtavaan rakenteeseen indusoituvalla smv:llä. Luonnollisesti muovisiin maakaasun jakeluverkon putkiin induktiovaikutus ei vaikuta. Ongelmallisia ovat juuri metalliset maasta eristetyt siirtoputket, joihin pitkittäinen smv pääsee indusoitumaan.

Induktiovaikutus riippuu käytännössä neljästä parametrasta: voimajohdon tilasta, putken ja voimajohdon välisestä etäisyydestä, altistuspituudesta ja voimajohdon tyypistä. Voimajohdon kahtena indusoivana tilana ovat normaalikäyttö ja 1-vaiheinen maasulku. Näiden eroista on kerrottu luvussa kolme. Näistä voidaan kuitenkin mainita, että vian aikana indusoituvat jännitteet ovat usein paljon suurempia kuin normaalikäytön aikaiset jännitteet. Toisaalta viat laukaistaan pois hyvin nopeasti, kun taas normaalikäytön aikaiset jännitteet ovat jatkuvia. Kaasuputken ja voimajohdon välinen etäisyys vaikuttaa keskinäisimpedanssin suuruuteen ja näin ollen induktiovaikutuksen voimakkuuteen.

Altistuspituus on se pituus, jonka voimajohto ja kaasuputki kulkevat sellaisella etäisyydellä toisistaan, jolla induktiovaikutus on merkittävää. Merkittävänä induktiovaikutuksena voidaan pitää indusoituvaa smv:tä, joka on suurempi kuin  $10 \frac{V}{km \text{ kA}}$ . Tällöin

yhden kiloampeerin virta siis indusoi kilometrin matkalla 10 voltin suuruisen pitkittäisen smv:n kaasuputkeen. Tämä vastaa Suomessa maksimissaan noin 10 kilometrin etäisyydellä toisistaan olevia kaasuputkia ja voimajohtoja. [2]

Indusoitunut kokonais-smv on käytännössä suoraan verrannollinen altistuspituuteen. Tämä ei kuitenkaan kaasuputkilla aina pidä paikkaansa. Indusoituneet jännitteet putkessa kasvavat etäisyyden funktiona lineaarisesti ainoastaan lyhyillä altistuspituuksilla (yhdestä muutamiin kilometreihin). Tämän jälkeen indusoituneen jännitteen suuruutta rajoittaa kaasuputken eristeen vuotoimpedanssi. Ilmiötä havaitaan erityisesti bitumipäällysteisillä putkilla. [2]

Voimajohdon tyypillä tarkoitetaan esimerkiksi voimajohdon eri jännitetasoja tai kaapelia. Näiden mukaan voimajohdon reduktiokerroin saattaa vaihdella hyvinkin suurella alueella ollen pienin käytännössä kaapeleilla. Kaapeleilla saattavat vaiheet sijaita myös paljon lähempänä toisiaan kuin avojohdolla, minkä takia normaalikäytön aikainen induktiovaikutus jää pienemmäksi.

### 5.2.3 Vaikutukset

Indusoituvien jännitteiden vaikutukset ovat maakaasuputkistossa samantapaisia kuin telejohdoissa. Ne voivat aiheuttaa vaaraa putken lähistöllä oleville työntekijöille tai muille ihmisille. Ne voivat myös vahingoittaa putkea tai sen eristystä, sekä ne voivat rikkoa tai häiritä putkeen liitettyjen laitteiden toimintaa. [2]

Kaasuputkistoon indusoituneet jännitteet saattavat muodostua vaarallisen korkeiksi. Kaasuputken kosketeltavia osia ovat katodisen suojausjärjestelmän suoja-asemien ja mittauspisteiden, venttiili- ja kaavinasemien, paineenvähennysasemien sekä ulospuhallusputkien maanpäälliset osat [41]. Nämä ovat tyypillisesti kuitenkin aidatuilla alueilla, jonne maallikoilta on pääsy estetty [42]. Kosketusjännitteen sallitut arvot on esitetty standardissa 5717. Ne ovat normaalikäytön aikaista ja laukaisematonta maasulkua lukuun ottamatta suurempia kuin Viestintäviraston määräämät arvot telejohdoille (luku 7.2 ja taulukko 7.2). [41]

Täytyy muistaa, että kaasuputkea kosketettaessa riski vaarallisen suurelle kosketusjännitteelle on riippuvainen eri tapahtumien todennäköisyyksistä. Tällä tarkoitetaan todennäköisyyttä, jolla ihminen koskettaa kaasuputken johtavaa osaa voimajohdon maasulun aikana, jonka indusoima smv ylittää sallitut rajat. Koska todennäköisyys tällaiselle tapahtumalle on pieni, on myös induktion aiheuttaman vaaratilanteen riski pieni. [2]

Kaasuputki tai sen yhteydessä oleva laitteisto saattavat vahingoittua indusoituvan smv:n seurauksena. Kaasuputken muovieriste saattaa vaurioitua sen jännitekestoisuuden ylittyessä. Eristemateriaalista riippuen tapahtuma on erilainen. Bitumipäällysteisillä putkilla purkaukset alkavat matalammilla jännitteillä ja laajemmalla alueella, kun taas polyeteenillä purkaus tapahtuu enemmän paikallisesti ja korkeammalla jännitteellä. Hyvin suurilla virrantiheyksillä on mahdollista, että putkeen sulaa reikä. Tällainen tapahtuma liittyy kuitenkin enemmän konduktiivisen kytkeytymisen kautta siirtyvään jännitteeseen esimerkiksi pylvään maadoituksista. Kaasuputkeen muodostuneen varauksen on todettu myös aiheuttaneen kaasuputkissa ac-korroosiota. [2]

Induktiiviset jännitteet saattavat aiheuttaa läpilyönnin myös putken sellaisissa jatkoksissa tai liitoksissa, joissa kaasuputki on galvaanisesti erotettu ja putkien välissä on jonkinlainen eristys. Tällaista eristystä käytetään erottamaan tietyt putkisto-osat toisistaan. Jos indusoituneen smv:n aiheuttama potentiaaliero on erotuskohdan välillä riittävän suuri, saattaa se aiheuttaa eristyksen rikkoutumisen. [2]

Kaasuputkeen kytketyt oheislaitteet ovat alttiita indusoituville jännitteille. Erityisen haitallisia indusoituvat jännitteet ovat katodisen suojausjärjestelmän laitteille, joiden toimintaa induktio voi häiritä. Jos maakaasuputkiston potentiaali muuttuu katodisen korroosiosuojauksen muodostaman suojapotentiaalialueen ulkopuolelle, maakaasuputken korroosiovaara lisääntyy. Myös itse laitteet voivat hajota. Laitteiden suojaamiseen voidaan käyttää ylijännitesuojia. [2] [41]

### 5.3 Rinnakkaiset voimajohdot

Kahden voimajohdon kulkeminen vierekkäin samalla johtokadulla on yleistä. Tähän johtaa halu käyttää tehokkaasti hyödyksi johtokatuja sekä tilan tarve ja ympäristön suojele. Voimajohdot voivat kulkea joko samoissa yhteispylväissä tai vain vierekkäisillä pylväillä. Voimajohdot vaikuttavat toisiinsa sähkömagneettisen kytkeytymisen kautta molempien johtojen normaalikäytössä, mutta suurempia vaikutuksia havaitaan, kun toinen johto on jännitteetön esimerkiksi huollon tai muun vastaavan takia. [49]

Kytkeytymistä tapahtuu jännitteettömään johtoon kahdella tavalla: induktiivisesti ja kapasitiivisesti. Molemmat tavat ovat riippuvaisia yhteisen yhdensuuntaisen osan pituudesta ja siirtynyt jännite on siis molemmilla tavoilla sitä suurempi, mitä pidemmän matkan johdot kulkevat vierekkäin. Myös johtojen keskinäinen geometria vaikuttaa. Lisäksi induktiivisen kytkeytymisen suuruuteen vaikuttaa virran suuruus ja kapasitiivisen kytkeytymisen suuruuteen jännite. Koska johdot ovat vierekkäisillä tai yhteispylväillä poikkeuksellisen lähellä toisiaan, saattaa niihin siirtyä poikkeuksellisen suuria jännitteitä. Työskenneltäessä tällaisilla johdoilla tulee ylimääräisiä työmaadoituksia käyttää huomattavasti tiheämmin. [49]

### 5.4 Muut johtavat rakenteet voimajohtojen lähetyvillä

Muita kohteita, joihin induktiivisesti kytkeytyviä jännitteitä syntyy, ovat pitkät metalliset aidat tai muut johtavat rakennelmat kuten metalliset riista-aidat, katot tai seinät. Näihin kytkeytyville jännitteille ei suoraan anneta missään raja-arvoja, mutta standardin SFS-EN 50341-1 mukaan kaikki vaaralliset tai vain häiritsevät vaikutukset on estettävä. [8] Käytännössä tämä tarkoittaa kohteen riittävää maadoittamista.

Esimerkeiksi voidaan mainita pari tapausta Suomessa. Vuonna 1984 sattui tapaus, jossa voimajohdosta siirtyi karja-aitauksen eristettyyn sähköpaimenlankaan jännite. Aita oli talven jäljiltä painautunut yhdessä kohdassa maata vasten, jolloin eristetty sähköpaimenlanka oli maasta kasvavan heinikon läheisyydessä. Kuivan kauden aikaan paimenlangan ja maan välillä syntyi kipinäointia, joka sytytti kuivan heinän ja ympäröivän

maaston palamaan. Tässä tapauksessa aita oli 300 metrin mittainen ja jännite siirtyi siihen sähkökentän vaikutuksesta (kapasitiivinen kytkeytyminen). [50] Myös Pirkanmaalla Kangasala – Toivila 420 kV voimajohdon alla useamman kilometrin matkalla kulkeva riista-aita on jouduttu maadoittamaan siihen siirtyvien jännitteiden takia. [51]

## 6 VAARAJÄNNITTEIDEN ENNALTA EHKÄISY JA NIILTÄ SUOJAUTUMINEN

Induktiivisten vaarajännitteiden syntymistä tulisi ehkäistä jo ennen voima- tai telejohtojen rakentamista, sillä näiden sijainti on ratkaisevin tekijä vaarajännitteiden syntymisessä. Suunnitteluvaiheessa harkittavia asioita ovat muun muassa voima- ja telejohtojen reitit, käytettävän siirtomedian valinta voimajohdolle tai telejohdolle (avojohto, kaapeli, valokuitu, masto), käytettävät kaapelit reduktio-ominaisuuksineen sekä ukkosjohtimien valinta. Sinällään voimajohdon rakentaminen maakaapelina ei suojaustarkoituksena ole korkeiden kustannusten takia kannattavaa [52].

Voimajohdolla tehtävät suojaustoimenpiteet rajoittuvat käytännössä reduktioon ja maasulkuvirran pienentämiseen. Reduktiota voidaan parantaa paremmin johtavilla ukkosjohtimilla tai erillisillä reduktiojohtimilla. Maasulkuvirtaa voidaan pienentää kasvattamalla verkon nollaimpedanssia. Tätä hyödynnetään Suomessa 123 kV verkossa maadoittamalla vain osa muuntajien tähtipisteistä tai maadoittamalla tähtipiste impedanssin kautta.

Tiettyjä suojaavia toimenpiteitä voidaan toteuttaa rakentamisen jälkeen. Näitä ovat erilaisten suojalaitteiden asennukset. Taulukkoon 6.1 on koottu lähteestä [40] erilaisia ratkaisuja lähinnä televerkossa induktiivisen kytketymisen rajoittamiseksi ja sen jännitteitä suojaamiseksi. Taulukon jälkeen on taulukossa esitetyistä ratkaisuista kerrottu enemmän.

## 6.1 Suojausratkaisuja

**Taulukko 6.1.** Induktiovaarajännitteiden ehkäisemiseen sopivia suojaustoimenpiteitä eriteltynä induktion vaikutuksen ja sen ilmenemistilanteen mukaan. [40]

<b>Suojaavat toimenpiteet</b>	Vaara				Häiriö		
	Henkilö- vahingot		Laite- vahingot		Kohina	käyttö- häiriö	
	Lyhytai- kainen (vian- aikai- nen)	Pitkäai- kainen (nor- maali- käyttö)	Lyhytai- kainen (vian- aikai- nen)	Pitkäai- kainen (nor- maali- käyttö)	Sing- naalien huono- neminen	Lyhytai- kainen (vian- aikai- nen)	Pitkäai- kainen (nor- maali- käyttö)
Voimajohdon ja telejohdon etäisyyden kasvattaminen	x	x	x	x	x	x	x
Ilmajohdon korvaaminen kaapelilla					x		
Paremmen reduktiokertoimen omaava kaapeli	x	x	x	x	x	x	x
Paremmen eristyskestävyyden omaava kaapeli			x	x			
Valokuitu	x	x	x	x	x	x	x
Radiolinkkimastot	x	x	x	x	x	x	x
Multiplex järjestelmät					x	x	x
Reduktiojohdin	x	x	x	x	x	x	x
Linjamuuntajat	x	x	x	x	x	x	x
Eristysmuuntajat	x	x	x	x	x	x	x
Neutrалоimismuuntajat	x	x	x	x	x	x	x
Aktiivinen reduktiojärjestelmä		x		x	x		x
KytKentäkela	x		x			x	
Ylijännitesuojat	x		x				
Jännitettä rajoittavat puolijohdekomponentit			x				

### Voimajohdon ja telejohdon etäisyyden kasvattaminen

Kun uutta televerkon reittiä suunnitellaan, tulisi se suunnitella niin kauas voimajohdosta kuin mahdollista. Sama pätee myös voimajohtojen sijoittamiseen. Sopiva etäisyys riippuu voimajohdon maasulkuvirran suuruudesta ja maan ominaisresistiivisyydestä. Nykyään trendinä on jossain määrin rakentaa suurjännitteisiäkin voimajohtoja teiden varteen. Tällöin tulisi muistaa, että teiden varret ovat myös telejohtojen kannalta suosittuja reitte-



jä. Valitettavasti niin voimajohdon kuin telejohtojenkin reitteihin ei aina voida vaikuttaa, vaan niiden valintaan vaikuttavat pitkälti maantieteelliset ja taloudelliset seikat.

### **Ilmajohdon korvaaminen kaapelilla ja reduktiokertoimen pienentäminen**

Puhelinajojohtojen korvaaminen kaapeleilla on hyvin hyödyllistä. Koska avojohdoilla ei ole johtavaa suojavaippaa ympärillä, altistuvat ne myös kapasitiivisille jännitteille. Lisäksi niillä ei ole käytännössä ollenkaan reduktiovaikutusta. Kaapeli suojaa johtoa myös jossain tilanteissa konduktiivisesti kytkeytyviltä jännitteiltä. Metallisen suojavaipan ansiosta kaapelilla on reduktio-ominaisuus, joka pienentää siihen indusoituvaa jännitettä. Kaapelityypistä riippuen sen reduktiokerroin voi olla erilainen. Induktiovaara-jännitteiden minimoimisessa tulisi reduktiokertoimen olla mahdollisimman pieni. Reduktiokerroin on sitä pienempi, mitä pienempi on suojavaipan resistanssi. Mikäli reduktiokerroin täytyy saada kaapelin omaa reduktiokerrointakin pienemmäksi, voidaan kaapeliin lisätä teräsnauha, joka suurentaa vaipan induktanssia. Myös kuparisia ja alumiinisia johtimia voidaan lisätä kaapelin päälle tai viereen. [40]

Jotta reduktio toimisi moitteettomasti ja virta jakautuisi reduktiokertoimen mukaisesti, tulisi johtavien suojavaippojen, armeerausten ja reduktiojohtimien olla yhtenäisiä koko matkalta. Tärkeää on myös maadoittaa nämä mahdollisimman pienen resistanssin kautta vähintäänkin kummastakin päästä. Resistanssin tulisi olla pieni verrattuna maadoitusten välillä olevaan vaipan resistanssiin. [40]

Luonnollisesti myös voimajohdon rakentaminen kaapeliksi pienentää sen indusoivaa vaikutusta. Tämä johtuu sen omasta suojavaipasta, jonka ansiosta suurjännitekaapeleilla on kertaluokkaa pienemmät reduktiokertoimet jo valmiiksi. Lisäksi ne ovat paremmin suojassa ilmastollisilta ylijännitteiltä, jotka aiheuttavat avojohtoihin usein maasulkuja.

### **Paremman eristyskestävyyden omaava kaapeli**

Jos odotettavissa olevat jännitteet ovat niin suuria, että normaali telekaapelin eristys ei tätä kestä, voidaan käyttää kaapeleita, joissa sähköistä eristystä on vahvistettu. Tällöin täytyy kuitenkin huomioda, että telekaapelin päässä olevat laitteet eivät välttämättä kestä jännitettä. Tällöin laitteet tulee suojata erikseen esimerkiksi ylijännitesuojin tai linjamuuntajalla. Kaapeleissa jännitekestoisuus voi ylittyä kolmessa kohdassa: johdin-johdin, johdin-suojavaippa tai suojavaippa-maa. Tyypillisesti kaapelilla testijännitteet ovat johtimen ja suojavaipan välillä 2000 V ja johtimien välillä 500 V. [40] Koska läheisiin johtimiin tyypillisesti indusoituu sama jännite, rajoittavaksi tekijäksi muodostuu juuri johdinten ja vaipan välinen jännite. On huomioitava, että mikäli telejohto eristetään linjamuuntajilla molemmista päistä ja telejohtoon indusoituva smv on symmetrinen koko johdon matkalta, sallittu indusoituva smv voi käytännössä olla 4000 V (ks. Kuva 5.8a).

Kaapelin kaikki parit tulisi suojata samalla menetelmällä. Jos osa suojataan linjamuuntajalla ja osa ylijännitesuojilla, muodostuu johtimien välille jännite-ero ylijännitesuojien toimiessa. Tämä saattaa vioittaa eristysrakennetta jo kohtalaisen pienilläkin jännitteillä. [40]

Suurin jännitekestoisuus lienee aina suojavaipan ja maan välillä. Se joudutaan mekaanisista syistä johtuen rakentamaan usein vahvemmaksi kuin sähköisen lujuuden kannalta olisi tarpeellista. Tästä syystä monet nykyaikaiset kaapelit omaavat jopa 100 kV jännitekestoisuuden [40]. Kyseisessä lähteessä ei mainita mitä jännitemuotoa kyseinen jännitekestoisuus edustaa. Käytännössä eristepaksuudesta johtuen jännitekestoisuus lienee kuitenkin ac-muotoisella jännitteellä useita kymmeniä kilovoltteja. Induktiojännitteiden kannalta tällä jännitekestoisuudella ei ole juurikaan merkitystä. Sen sijaan konduktiivinen kytkeytyminen on mahdollista, mikäli telekaapeli kulkee lähellä voimajohdon maadoituksia.

### **Valokuitu**

Telejohtoja voidaan korvata optisilla kuiduilla. Koska kuituihin sähkömagneettiset kentät eivät vaikuta, niitä voidaan periaatteessa käyttää jopa vaativimmissakin olosuhteissa. Nykyisissä valokaapeleissa on kuitenkin usein myös metallisia osia muun muassa suojaamassa kaapelia asennettaessa. Näihin metallisiin osiin voi indusoida jännitteitä, jotka on otettava huomioon telelaitteistossa tehtävissä töissä. [40]

### **Radiolinkkimastot**

Radiolinkkimastoilla voidaan korvata kuparisia ja valokaapeliyhteyksiä. Linkkien käyttämä taajuus on sellaisella taajuusalueella, ettei se häiriinny voimajohtojen aiheuttamista sähkömagneettisista kentistä. [40]

### **Multiplex-järjestelmät**

Kanavointijärjestelmät eli multipleksointijärjestelmät vaativat linjamuuntajan telejohdon ja laitteiston väliin. Tämä erottaa johdon galvaanisesti laitteistosta, johon johdolle indusoiduun smv ei pääse siirtymään. Indusoiduun smv:tä rajoittaa ainoastaan muuntajan eristyslujuus, joka on samaa luokkaa kuin telekaapeleilla. Myös niin sanotut PCM-järjestelmät (pulse-code modulation) vaativat muuntajan johdon päähän, jolloin niissäkään smv ei pääse siirtymään laitteistoon. [40]

### **Reduktiojohdin**

Reduktiojohtimet ovat maadoitettuja johtimia, jotka kulkevat yhdensuuntaisina indusoidun tai indusoidun johdon kanssa. Reduktiojohtimen toimintaa on selvitetty kuvassa 4.3. Käytännössä reduktiojohtimeen indusoiduu samansuuntainen smv kuin kohteeseenkin. Koska reduktiojohdin on maadoitettu, siinä kulkeva virta indusoi kohteeseen myös alkuperäistä vastakkaissuuntaisen smv:n, joka pienentää alkuperäistä smv:tä. [28]

Reduktiojohtimia on luvun 4 mukaisesti hyvin monenlaisia: metalliset suojavaipat tele- ja suurjännitekaapeleissa, erilliset maajohtimet telekaapeleissa, ukkosjohtimet, raiteet, metalliset putkistot ja muut metalliset johtavat rakennelmat. Tietyissä tilanteissa kaapeliojaan voidaan laskea myös täysin erillinen reduktiojohdin pelkästään rajoittamaan indusoiduun jännitettä. Koska hyvä maadoitus on hyvän reduktio-ominaisuuden kannalta välttämätöntä, paljaat kuparijohtimet ovat tässä hyviä, sillä niiden maadoitusresistanssi jää välttämättä pieneksi.

Erityinen esimerkki hyvästä reduktiojohtimesta on telekaapeleissa kulkevat ylimääräiset parit. Koska kaapeleiden valmistuskoot parimäärällisesti eivät useimmiten täsmää

liittyjien lukumäärään, jää kaapelista tietyt parit käyttämättä. Tällaisessa tapauksessa näihin ei tarvitse asentaa ylijännitesuojia, vaan ne voidaan suoraan yhdistää molemmista päistä hyvään maadoitukseen. Tällä tavoin ne toimivat luontaisesti reduktiojohtimena. Reduktiokerroin riippuu maadoitettavien parien resistanssista ja lukumäärästä. Tällaisessa tilanteessa tiedonsiirto ei keskeydy, jos ylijännitesuojien syttymiseltä vältytään. Tällöin tulee kuitenkin ottaa huomioon parien välinen eristyslujuus. [40]

### **Linjamuuntajat**

Linjamuuntajat tarjoavat galvaanisen erotuksen telejohdon ja siihen liitetyn laitteiston välille. Linjamuuntajan kanssa ei voi käyttää dc siirtoa. Linjamuuntajaa käytettäessä telejohdossa olevat ylijännitteet eivät siirry muuntajan toiselle puolelle elleivät ne ylitä muuntajan eristyslujuutta, joka yleensä testataan 50 Hz taajuisella 2 kV jännitteellä 10 sekunnin ajan. Linjamuuntajat suojaavat telelaitteistoa myös normaalikäytön aikaisen induktion aiheuttamilta häiriöiltä. Kaapelissa tehtävien huoltotoimenpiteiden aikana tietyt turvallisuusnäkökulmat on otettava huomioon. Linjamuuntajien korkeiden kustannusten ja monimutkaisuuden takia niiden käyttö suojaustarkoituksissa rajoittuu vain yksittäisiin huomattavan suuria häiriöitä omaaviin kohteisiin. [40]

### **Eristysmuuntajat**

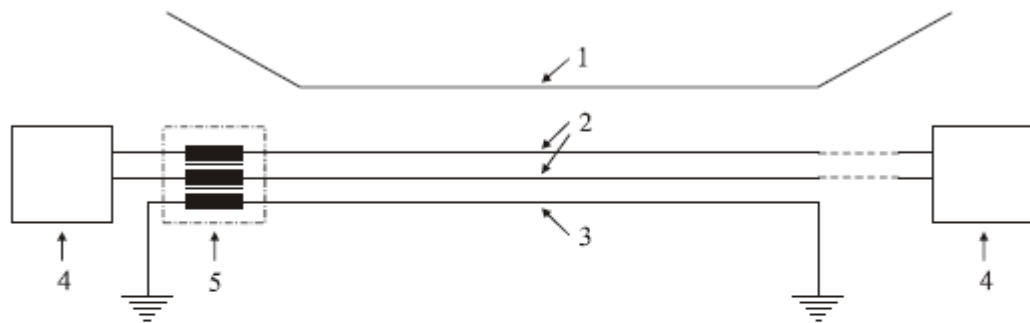
Eristysmuuntajalla voidaan voimakkaan induktioaltistuksen omaava johto erottaa galvaanisesti lyhyempiin osuuksiin. Tällöin yksittäisiin osuuksiin indusoituva smv pysyy sallittujen raja-arvojen alapuolella. Eristysmuuntaja toimii siis käytännössä samalla lailla kuin linjamuuntaja. Ainut ero on, että eristysmuuntajat voidaan suunnitella kestäämään huomattavasti suurempia jännitteitä. Myös eristysmuuntajat vaativat telejärjestelmän käyttävän vaihtovirtaa tai pulsseja. [40]

Eristysmuuntajat saattavat aiheuttaa tiettyjä ongelmia. Esimerkiksi signaalin heikentymien on suurempaa erityisesti pienitaajuisilla virroilla. Ongelmista johtuen eristysmuuntajia ei tulisi yhdelle johdolle asentaa neljää tai viittä enempää. [40]

### **Neutraloimismuuntajat**

Indusoituvat jännitteet voidaan kompensoida täydellisesti vastakkaissuuntaisella jännitteellä. Tällainen jännite saadaan aikaan esimerkiksi reduktiojohtimella, mutta pelkästään reduktiojohdinta käytettäessä vaikutukset voivat jäädä riittämättömiksi. Tällaisissa tapauksissa erityinen pilottijohdin maadoitettuna suojattavan telejohdon molemmista päistä voidaan kytkeä suojattavaan telejohtoon neutraloimismuuntajan kautta. Pilottijohtimena neutraloimismuuntajan ensiökäämitykselle voidaan käyttää muun muassa telekaapelin käyttämätöntä johdinparia tai kaapelin eristettyä suojavaippaa. Myös erillistä eristettyä johdinta maadoitettuna molemmista päistään, joka altistuu induktiolle samalla tavalla kuin johdinparit, voidaan käyttää.

Neutraloimismuuntajan kierrosluku ensiössä ja toisiossa voi olla sama tai eri. Indusoituneen smv:n aiheuttama virta pilottijohtimessa tuottaa jännitteen telejohdon johtimiin, joka vastustaa sinne indusoitunutta smv:tä ja kompensoi sen neutraloimismuuntajan toimesta lähes kokonaan. Periaatteellinen kuva neutraloimismuuntajasta on kuvassa 6.1. [40]



- 1 Indusoiva voimajohto
- 2 Vaikutuksen alaiset telejohdon johtimet
- 3 Pilottijohdin
- 4 Televiestintälaite
- 5 Neutraloimismuuntaja

**Kuva 6.1.** Pääperiaate neutraloimismuuntajasta. [40]

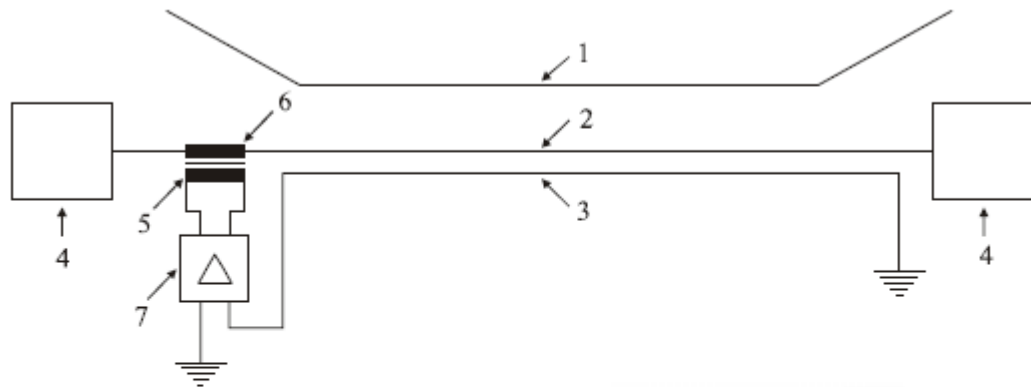
Neutraloimismuuntajalla saattaa esiintyä ongelmana ylikuulumista. Tämä voidaan kuitenkin tietyin ratkaisuin ehkäistä. [40]

Neutraloimismuuntaja sopii suojaksi niin normaalikäytön kuin vianaikaistenkin indusoituvien jännitteiden torjuntaan. Se sopii myös hyvin jälkeinpäin asennettavaksi. Neutraloimismuuntajia voidaan käyttää useampaa sarjassa, jos yhden jännitekestoisuus ylittyy. [40]

### Aktiivinen reduktiojärjestelmä

Aktiivinen reduktiojärjestelmä on kehittyneempi versio neutraloimismuuntajasta. Siinä saman amplitudinen, mutta  $180^\circ$  vaihesiirrossa oleva jännite siirtyy suojattaviin johdinpareihin. Tästä syystä indusoitunut jännite suojattavan telekaapelin päissä katoaa lukuun ottamatta pientä jäännösjännitettä. Järjestelmän perustana on vahvistin, jota ohjaa pilot-tijohtimeen indusoitunut smv. Pilotijohtimena täytyy käyttää telekaapelin johdinparia, jotta voidaan varmistua siitä, että siihen indusoituu juuri sama smv kuin suojattaviin johtimiinkin. Vahvistin kytketään muuntajan kautta suojattavan telekaapelin johtimiin. Periaatteellinen kuva aktiivisesta reduktiojärjestelmästä on esitetty kuvassa 6.2. [40]

Aktiivista reduktiojärjestelmää ei voida käyttää vian aikaisten indusoituvien jännitteiden torjumiseen, mutta normaalikäytön aikaisiin se soveltuu. Sillä voidaan vähentää myös telejohdoista harmonisia taajuuksia. Järjestelmää käytetään yleensä yhdysjohtojen suojaamiseen, mutta tilaajajohtojen suojaamiseen se on kallis. [40] Koska Suomessa yhdysjohdot ovat pääosin valokaapeleita, ei järjestelmälle ole Suomessa käyttöä.



- 1 Indusoiva voimajohto
- 2 Johdinparit
- 3 Pilottijohdin
- 4 Televiestintälaite
- 5 Ensiohkäätys pilottijohtimen vahvistetulle virralle
- 6 Kaikkien johdinparien muodostama toisiokäämitys
- 7 Vahvistin

**Kuva 6.2.** Pääperiaate aktiivisesta reduktiojärjestelmästä. [40]

### KytKentäkela

KytKentäkelaä käytetään suojana ylijännitesuojien rinnalla. Jos telejohto suojataan ylijännitesuojin, saattaa joskus ilmetä tilanne, jolloin vain osa ylijännitesuojista toimii ja tiettyjen johdinparien välille syntyy jännite-ero. Tätä voidaan ehkäistä asentamalla ylijännitesuojien kanssa samaan virtapiiriin kela. Tämä saa yhden ylijännitesuojan syttyessä aikaan suuremman jännite-eron myös muiden ylijännitesuojien yli, jonka vuoksi myös muut suojat syttyvät. [40]

### Ylijännitesuojat

Yleisin induktiojännitteiden rajoittamiseen käytettävä keino on ylijännitesuojat ja maadoittaminen. Suojaustapa on hyvin taloudellinen verrattuna muihin tässä luvussa esitettyihin. Suojat kuitenkin vaativat aika-ajoin tarkastuksia ja vaihtamista, joten myös niistä aiheutuu kustannuksia. Yleisesti käytetyillä kaasupurkausylijännitesuojilla normaaleissa oloissa odotettavissa oleva elinikä on 20 vuotta, mutta niitä suositellaan tarkistettavaksi noin kuuden vuoden määräajoin. [40]

Ylijännitesuojat ovat ylivertaisia siinäkin mielessä, että jo Viestintäviraston määräys 43D/2010M [23] määrää televerkon suojattavaksi ylijännitesuojilla ilmastollisia ylijännitteitä vastaan. Näin ollen televerkossa on valmiiksi jo tietty suojaustaso, ja induktiojännitteiden tapauksessa tehtäväksi jää niiden riittävyden tarkastaminen. Jos katsotaan aiheelliseksi, voidaan suojia jälkeenpäinkin lisätä esimerkiksi pitkien yksittäisten johtojen puoleen väliin niin sanotuiksi välisuojuiksi. Myös telejohdon maadoituksia saatetaan joutua parantamaan sallittujen raja-arvojen aikaansaamiseksi. [13]

Ylijännitesuojat perustuvat kipinäväliin. Yleisimpiä suojia ovat ilmakipinävälisuoja, hiilisuoja ja kaasutäytteiset ylijännitesuojat. Ilmakipinävälisuojuja käytetään lähinnä ilmastollisilta ylijännitteiltä suojaamiseen, niiden noin 1 kV syttymisjännitteen

takia. Suomessa niitä ei ilmeisesti ole kuitenkaan koskaan käytetty. Hiilisuoijat ovat vanhoja, eivätkä niiden ominaisuudet ole kovin hyviä. Niiden toiminnan perustuessa hiilikärkien välissä tapahtuvaan sähköpurkaukseen tasalaatuisten hiilisuojiin valmistus on hankalaa, ja hiilen hauraudesta johtuen ne ovat herkkiä rikkoutumaan. [53]

Kaasutäytteisissä ylijännitesuojissa elektrodit sijaitsevat kaasulla (esimerkiksi argonilla tai neonilla) täytetyssä suljetussa kammiossa. Useilla suoilla kammiossa saattaa olla myös hieman radioaktiivista ainetta ionisaation kiihdyttämiseksi. Sen määrä on kuitenkin niin pieni, ettei se vaadi erityisiä toimenpiteitä [40]. Suojien syttymisjännite riippuu elektrodien etäisyydestä ja kaasun paineesta (Paschenin laki) ollen yleisesti noin 230 tai 350 voltia [40] [53]. Jännösajännite suoilla on luokkaa 10–25 voltia. Suojia on saatavissa neljää eri päätyyppiä niiden adapterirakenteen mukaan: sivukosketinsuoja, nappisuoja, veitsikosketinsuoja ja kytkentälangallinen suoja. Edelleen suojia on 2-elektrodisia ja 3-elektrodisia. Näistä ensimmäiset kytketään jokaisen johtimen ja maan välille ja jälkimmäiset parin ja maan välille. Yleisesti kaasutäytteisten ylijännitesuojien parhaita puolia on niiden stabiilisuus eri käyttöolosuhteissa. [53]

Ylijännitesuojien käytössä tietyt asiat tulee huomioida. Ylijännitesuojat tulee kytkeä maan potentiaaliin. Tämä voidaan tehdä joko suoraan tai kipinävälin kautta maadoittamalla. Suojatakseen johtimien eristystä, ylijännitesuojat asennetaan johtimen ja kaikkien metallisten vaippojen, suojajohtimen ynnä muiden välille, jotka myös yhdistetään toisiinsa ja maadoitetaan. Tällä tavoin saavutetaan myös huonosti johtavassa maaperässä helpommin riittävän pieni maadoitusresistanssi. Suojien mitoituksessa on tarkastettava, etteivät suojat laukea korkeilla normaalikäyttöajännitteillä mutta laukeavat aina haitallisissa tai induktiotapauksissa. On myös huomioitava, että suojien toimiessa telejohto on maadoitettuna, mistä johtuu pieni katko tiedonsiirtoon. Puheluihin katkolla ei juuri ole vaikutusta, mutta suurten datasiirtojen häiriintyminen voi muodostua ongelmaksi. [40]

Ylijännitesuojia tulisi asentaa ainakin tilaajalle, kaapelipäätteisiin ja keskuksiin. [40] Ylijännitesuojat voidaan asentaa myös tai ne ovat jo valmiiksi asennetut pitkän telejohdon puoliväliin niin sanotuiksi välisuojuiksi. Välisuojuapaikat tarvitaan johdinkatkeamien ja ylijännitesuojien vaurioitumisen sekä osaksi myös voimajohdon ja telejohdon yhdensuuntaisen osuuden kohdalla sattuvien maasulkujen varalta. Maasulun sattuessa voimajohdon ja telejohdon yhdensuuntaisen osan ulkopuolella ei välisuojuapaikan kautta kulje lainkaan induktiovirtaa maahan. [19]

### **Jännitettä rajoittavat puolijohdekomponentit**

Herkkiä laitteita suojattaessa voi olla välttämätöntä käyttää useampaa suojatyyppiä. Nopeatoimisia puolijohdekomponentteja käytetään kaasupurkaussuojien kanssa. Ne toimivat nopeammin kuin kaasupurkaussuojat ja ottavat osalleen osan purkautuvasta energiasta. Puolijohdekomponentit on tyypillisesti rakennettu valmiiksi herkkien laitteiden sisään suojatakseen laitetta ja sen käyttäjää. Puolijohdekomponentteja ovat muun muassa varistorit, tyristorit, zenerdiodit ja diodit. [40]

## 6.2 Työturvallisuus

Työskentelyssä vaarajännitteille alttiilla johdolla tai muulla johtavalla rakenteella sekä myös näiden läheisyydessä tulee huomioida tiettyjä turvallisuuskäsitteitä. Vaaran työskentelevälle henkilölle aiheuttaa mahdollisuus jännitteisestä osasta saatua sähköiskuun. Jännitteinen osa saattaa olla itse laitteisto, jossa työ tehdään, mutta se voi olla myös jännitteisestä laitteistosta normaalisti jännitteettömään osaan siirtynyt jännite. Kolmesta vaarajännitetyypistä (induktiivinen, kapasitiivinen, konduktiivinen) induktiivisen kytkeytymisen vaikutusetaisyys on pisin. Toisaalta lähellä indusoivaa johtoa vaarajännitteiden tapauksessa on usein osansa kaikilla kytkeytymismuodoilla.

Ehjällä ja induktiojännitteiltä suojatulla johdolla, jonka suojaus on kunnossa, ei esiinny vaarallisia jännitteitä. Vaaralliseksi tilanne muuttuukin vasta, kun johto on mennyt vian seurauksena poikki tai jos siinä tehdään huolto- tai rakennustoimenpiteitä. Johto saatetaan joutua myös katkaisemaan tai sen ylijännitesuojia purkamaan kytkentöjen ja mittauksen takia. [54]

Ensimmäinen askel työturvallisuudessa on vaaran tiedostaminen. Varsinkin voimajohdon lähettyvillä tehtävässä työssä tulisi arvioida, aiheuttaako jokin vaarajännitteiden kytkeytymismuoto ongelmia. On muistettava, että vaarallinen potentiaali voi tulla kauempanakin niin sanottuna takaperoisena kosketusjännitteinä. Sähkölaitteistossa tehtävässä työssä työmaadoitus on usein välttämätöntä, joka osaltaan jo poistaa vaarallisen sähköiskun vaaran. Toisaalta, jos vähintäänkin yhden vaarajännitteen kytkeytymismuodon uskotaan aiheuttavan ongelmia, on ryhdyttävä tarvittaviin lisäsuojaustoimenpiteisiin. Näitä voivat olla esimerkiksi työmaadoitusten lisääminen. Huomion arvoisia vaarajännittekohteita ovat muun muassa:

- voimajohdon lähettyvillä olevat pitkät telejohdot
- valokaapelit, jos niissä on johtava metallivaippa
- voimajohdot vierekkäisillä tai yhteispylväillä, kun toinen virtapiiri on käytössä
- muut maasta eristetyt pitkät voimajohdon suuntaiset suojaamattomat johtavat rakenteet

Ennen työn aloittamista on soveltuvin osin tehtävä seuraavanlaisia toimenpiteitä. Työkohteesta voidaan piirtää luonnos tai kartta, johon merkitään vaaralliset alueet ja kohteet, joilla on noudatettava erityistä varovaisuutta. Kaikki kosketeltavissa olevat vaaralliset osat ja laitteet tulee myös merkitä selvästi. Työntekijöille, jotka todennäköisesti työskentelevät vaarajännitteille alttiilla johdoilla, tulee antaa selkeät tiedot vaaran tunnistamiseksi sekä tarkat ohjeet käytettävistä työmenetelmistä ja suojavälineistä. Eri-tyisesti maadoittamisessa ja kytkentätöissä oikeanlaisten eristävien työvälineiden käyttö on välttämätöntä. Koska useimmat voimajohdon maasulut saavat alkunsa ukkosesta, tulee työt lopettaa välittömästi ukkosen lähestyessä. [40]

Mikäli tiedetään, että työkohteessa indusoituneet jännitteet saattavat nousta vaarallisen suuriksi, myös seuraavanlaisia ohjeita tulee noudattaa. Vaarajännitteille alttiilla kohteella ei saisi työskennellä yksin ja työntekijöiden tulisi olla koulutettuja työskentele-

mään kyseisellä kohteella. Käytettäessä eristäviä työvaatteita (hanskat, kengät), työvälineitä tai sähkölaitetta (esimerkiksi lamppua tai mittalaitetta) tulee huolehtia siitä, että eristys on riittävä ja se on asianmukaisessa kunnossa. Jos työ halutaan tehdä erityistä varovaisuutta noudattaen, työ pitäisi suorittaa indusoivan voimajohdon jännitteettömänä aikana. [40]

Käytännössä työskentelyn aikaisena suojaustoimenpiteenä voidaan käyttää kahta periaatetta. Työntekijä eristetään maasta ja kaikista kosketeltavissa maahan yhteydessä olevista metallijohtimista ja -osista. Toinen vaihtoehto on tehdä potentiaalintasaus eli yhdistää kaikki kosketeltavissa olevat metalliosat toisiinsa ja tarvittaessa myös maahan. [54]

Rakennusvaiheessa vaarallisia jännitteitä voidaan ehkäistä asentamalla telejohtoa lyhyissä osissa, jolloin indusoitunut jännite ei pääse muodostumaan liian suureksi. Tällöin ainoastaan osien liittämisen toisiinsa tulee olla varovainen. Myös muissa johdoilla tehtävissä toimenpiteissä johdon katkaisemista ja maadoittamista voidaan hyödyntää. [54]

Työskenneltäessä telekaapelin tai avojohdon jollain osalla, tulisi telejohto maadoittaa työkohdan molemmin puolin. Maadoittaminen tulee tehdä myös valokaapeleilla, joilla on metallinen suojavaippa. Erityisesti, jos esimerkiksi kaapelin vaippa joudutaan katkaisemaan, tulee ennen katkaisemista vaipan molemmat puolet yhdistää toisiinsa niin sanotulla ylivientijohtimella ja lisäksi maadoittaa. Myös johtimien jatkamisessa tulee johtojen molempien puolien vaipat ensimmäiseksi yhdistää toisiinsa ylivientijohtimella. Jatkamistyössä työalue voidaan myös eristää kokonaan maasta erityisillä eristävillä materiaaleilla, kuten kumimatoilla. [40][54]

Keskuksissa työskenneltäessä työkohde tulee merkitä selkeästi. Jännitteisiin ja maadoitettuihin osiin samanaikaisesti koskeminen tulisi estää. Lisäksi, jos työ kestää kauan ja työkohteen täydellinen erottaminen induktiolle alttiista osasta on mahdollista, erottamista voidaan harkita. [40]

Tarkemmat työohjeet työskentelyyn vaarajännitteille alttiilla telejohdolla ovat VHV-ohjeessa 4 [54] ja ITU-direktiivien osassa 7 [40].



## 7 DIREKTIIVIT, STANDARDIT, OHJEET JA MÄÄRÄYKSET

Induktiovaarajännitteistä, kuten muistakin vaarajännitteistä, puhutaan monessa lähteessä. Niiden ehkäisemiseksi on standardoituja ohjeita ja erilaisia suosituksia. Standardeissa myös määrätään, ettei induktio saa aiheuttaa vaarallisia vaikutuksia. Tässä kappaleessa on esitelty erinäisiä standardeja, ohjeita ja määräyksiä, joita tulee soveltaa induktiovaarajännitetarkasteluissa.

### 7.1 SFS-EN 50341-1, SFS-EN 50341-3-7 ja SFS 6001

Standardin SFS 50341-1 ”Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä” kohdassa 5.6.2 sanotaan, että voimajohdon induktiovaikutukset on otettava huomioon, kun voimajohdon läheisyydessä on pitkiä metallisia rakenteita (esim. telelaitteistoja, aitoja, johtoja tai putkia) tai laajoja esineitä (esim. johtavia kattoja, säiliöitä tai suuria ajoneuvoja). Standardi velvoittaa verkonhaltijan ryhtymään kaikkiin toimenpiteisiin estääkseen tai poistaakseen mahdollisesti vaaralliset tai vain häiritsevät induktiovaikutukset. Tämä tapahtuu menettelytavoilla, joista asianosaisten tulee sopia keskenään. [8]

Yleisesti ongelmia syntyy induktiosta metallisiin rakenteisiin, jotka eivät ole hyvässä johtavassa yhteydessä maahan. Tällaisissa tapauksissa kaikki johtavat rakenteet on yhdistettävä maahan. Pitkien metallisten voimajohdon kanssa yhdensuuntaisten rakenteiden, jotka on maadoitettu yhdessä tai muutamassa kohdassa, on yhdistettävä maahan sopivin välein ja/tai katkaistava eristävillä osilla silmukoiden pienentämiseksi. [8]

Kohdassa 5.6.3 puhutaan häiriövaikutuksista telepiireissä. Standardin tämä osa määrittelee sen, että häiriölaskelmien ja häiriöiden hyväksyttävälle tasolle saattamiseksi tarvittavien toimenpiteiden on perustuttava asiaa koskeviin kansainvälisiin ja kansallisiin standardeihin ja/tai yleisesti hyväksyttyihin käytännön menettelyohjeisiin (ts. ITU Directives (CCITT) Vol. VI ”Danger and Disturbance”) ja/tai erityisiin osapuolten väliin sopimukseen. Edelleen määrätään kiinnittämään huomiota myös sellaisiin indusoituneisiin jännitteisiin, joista voi aiheutua vaaraa ihmisille. [8]

Standardissa on myös maininta, että ”CENELEC CLC/TC210, WG03” valmistelee vaarajännitteitä koskevia Eurooppalaisia standardeja EN 50351 ja EN 50352. Cenelec sai valmiiksi uudet standardiehdotukset, joita myös paranneltiin ja korjattiin ensimmäisen esittelyn jälkeen vuonna 2001. Standardit kuitenkin hylättiin vuonna 2003 olleessa äänestyksessä. [51]

Standardissa SFS-EN 50341-3-7 ”Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt” luvun 5.4.5.4 kohdassa FI.6 mainitaan, että induktiivisen ja kapasitiivisen kytketymisen

kautta muodostuvat vaaralliset jännitteet saattavat rajoittaa suurjännitejohdon viemistä pitkiä matkoja yhdensuuntaisena pienjännitejohdon, telejohdon tai mekaanisen johdon kanssa. Muuten standardissa asian suhteen viitataan ainoastaan standardeihin SFS 6001 ja SFS 5717 sekä Viestintäviraston määräykseen viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta. [55]

Standardissa SFS 6001 lukee siirtyvien jännitteiden osalta, etteivät standardin vaatimukset koske suurjänniteverkon maadoitusjärjestelmiin yhteydessä olevia tai niiden läheisyydessä olevia televerkkoja. Standardissa vain viitataan televerkkoon siirtyvien jännitteiden varalta ottamaan huomioon kansainväliset standardit ja direktiivit (esimerkiksi ITU-direktiivit). [12]

## 7.2 SFS 5717

Standardia SFS 5717 ”Maakaasun siirtoputkiston sijoittaminen suurjännitejohdon tai -kytkinlaitoksen läheisyyteen” sovelletaan standardin nimen mukaisissa tilanteissa. Standardi koskee periaatteessa kaikkia suurjännitelaitteistoja. Käytännössä kuitenkin useimmissa tilanteissa muiden tekijöiden asettamat rajoitukset ovat määrääviä, eikä maakaasuputkisto aseta lisävaatimuksia. [41]

Standardin mukaan suurjännitejohtoa ja maakaasun siirtoputkistoa sijoitettaessa toistensa läheisyyteen on otettava huomioon niiden keskinäiset vaikutukset. Vaikutusten selvittämisen tulee tapahtua yhteistyössä eri rakenteiden haltioiden kanssa. [41]

Standardissa selvitetään induktiivisen kytkennän luonne ja siihen vaikuttavia seikkoja. Siinä myös määritellään induktiivisella kytkentymisellä siirtoputkistoon siirtyvän jännitteen sallitut raja-arvot maakaasuputkiston paljaissa kosketeltavissa osissa. Raja-arvo on normaalikäytössä 25 V ja vähintään 110 kV järjestelmän maasulussa  $1000/\sqrt{t}$  V, missä  $t$  on maasulun yhtäjaksoinen kesto aika sekunteina. Jos suurjännitejärjestelmän yksivaiheista maasulkua ei kytketä itsetoimivasti pois, raja-arvo on 100 V. [41]

Standardissa kerrotaan myös selvitystoimenpiteistä, joita tarvitaan tutkittaessa kaasuputkistoon mahdollisesti siirtyviä jännitteitä. Standardissa mainitaan, että osapuolten tulee ottaa yhteys toisiinsa suunnitteluvaiheessa ja tutkittava, että sallittuja jänniterajoja ei ylitetä. Tarkistamistarvetta voidaan arvioida standardissa olevan taulukon avulla (soveltaen taulukko 7.1), jossa on selvitetty mahdollisten yhdensuuntaisten rakenteiden maksimipituuksia. Taulukko huomioi sekä normaalikäytön että vian aikaiset vaikutukset. Jos yhdensuuntainen osuus osuu maakaasuputkiston päättymiskohdan lähelle, ovat yhdensuuntaisten pituuksien maksimiarvot puolet taulukon 7.1 arvoista. Edelleen standardissa ohjeistetaan menettelyohjeet, jos maakaasuputkistolla on katodinen korroosiosuoja. Myös maakaasuputken rakentamiseen suurjännitelaitteiston läheisyyteen annetaan ohjeita. [41]

**Taulukko 7.1.** Maakaasuputkiston ja suurjänniteavojohdon yhdensuuntainen sijoittaminen.  $P \hat{=}$  portaali johto,  $T \hat{=}$  ns. tannenbaum-johto,  $J \hat{=}$  hyvin johtavat ukkosjohtimet (feral),  $H \hat{=}$  huonosti johtavat ukkosjohtimet (teräs) tai ei ukkosjohtimia,  $\infty \hat{=}$  rajoittamaton,  $K \hat{=}$  kielletty. [41]

Putkiston ja johdon välinen etäisyys (m)	Suurin sallittu yhdensuuntainen osuus (km)					
	400 kV tai 220 kV johto			110 kV johto		
	P, J	P, H	T, J	P, J	P, H	T, J
yli 3000	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2000 ... 3000	$\infty$	10	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
1000 ... 2000	30	4	7	$\infty$	$\infty$	$\infty$
500 ... 1000	9	3	4	$\infty$	25	30
200 ... 500	5	2	2,5	$\infty$	11	7
100 ... 200	4	1,5	2	$\infty$	6	5
50 ... 100	2	1,5	1	15	4	3
20 ... 50	1	1	0,5	5	3	2
alle 20	K	K	K	K	K	K

### 7.3 Määräys viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta

Määräys 43D/2010M koskee yleisiä viestintäverkkoja, niihin liitettyjä laitteita sekä näiden suojaamista ilmastollista alkuperää olevilta sähkölaitteistojen aiheuttamilta ylijännitteiltä ja ylivirroilta. Määräyksessä annetaan myös raja-arvot voimajohdosta viestintäverkon johdon johtimiin indusoituville jännitteille. Raja-arvot annetaan erikseen normaalikäytön sekä vian aikaisille jännitteille. [23]

Määräyksessä määrätään viestintäverkon rakenteesta. Siinä määritellään perussuojaus, joka täytyy verkossa olla ilmastollisia ylijännitteitä vastaan. Tähän liittyy metallivaiipan maadoitukset sekä johdinparien ja vaiipan väliset ylijännitesuojat sekä näiden sijainnit. Näitä tietoja voidaan käyttää hyväksi arvioitaessa johtimien potentiaaleja sekä maadoitusjännitteitä.

Normaalikäytössä viestintäverkon johtimiin indusoituva pitkittäinen sähkömotorinen voima ei saa ylittää 60 V. Kyseistä raja-arvoa tulee soveltaa myös yksivaiheisessa maasulussa, jota ei kytketä itsetoimivasti pois. [23]

Määräys asettaa raja-arvot viestintäverkon johdon johtimiin suurjännitelaitteiston yksivaiheisessa maasulussa indusoituvalle pitkittäiselle sähkömotoriselle voimalle tilanteessa, jossa viestintäverkkoa ei ole suojattu. Tällöin sallittu smv riippuu vian kestosta. Mikäli suurjännitelaitteisto on itsetoimivasti ja nopeasti pois kytkettävässä yksivaiheisessa maasulussa, pitkittäinen smv ei saa ylittää arvoa 430 V. Tämä raja-arvo koskee siis myös keskijänniteverkkoa. Jos kyseessä on vähintään 110 kV suurjännitelaitos, ovat raja-arvot eri vian laukaisuaajoilla taulukon 7.2 mukaiset.

**Taulukko 7.2. indusoituvan smv:n raja-arvot [23]**

Raja-arvo	1-vaiheisen maasulun kesto aika $t$
1200 V	$t \leq 0,2$ s
900 V	$0,2 < t \leq 0,35$
650 V	$0,35 < t \leq 0,5$
430 V	$t > 0,5$ (Laitteiston kuitenkin oltava itsetoimivasti ja nopeasti pois kytkettävä)

Jos smv ylittää taulukon 7.2 mukaisen raja-arvon, on suojaustoimenpitein huolehdittava siitä, ettei jännite maata vasten ylitä samaisen taulukon 7.2 mukaista raja-arvoa. Edelleen määräys määrittelee viestijohdon johtimien ja vaipan välisen sallitun jännitteen. Jännite saa olla 60 % pienimmästä johtimien tai laitteiden ja vaipan tai maan välisestä tasa- tai 85 % vastaavasta 50 Hz koejännitteestä, jos johtimet eivät ole kosketeltavissa.

## 7.4 ITU-direktiivit

ITU-direktiiveillä tarkoitetaan teosta ”Directives Concerning the Protection of Telecommunication Lines against Harmful Effects from Electric Power and Electrified Railway Lines”, joka jakautuu yhdeksään osaan. Osat käsittelevät seuraavanlaisia asioita:

1. Tele-, sähkövoima- ja sähköratajärjestelmien toimintaperiaate
2. Indusoituneiden jännitteiden ja virtojen laskenta yleisissä tapauksissa: indusoituneiden suureiden laskentaa käyttäen yksinkertaisia arvioita tai laskentamenetelmiä
3. Kapasitiivinen, induktiivinen ja konduktiivinen kytkeytyminen: fysikaalinen teoria ja laskentamenetelmät: käsittelee sähkömagneettisen kytkennän teoriaa ja tarkan laskentamenetelmän ekvivalenttisille piiriparametreille ja niistä johtuville jännitteille ja virroille
4. Indusoivat virrat ja jännitteet sähköradoilla
5. Indusoivat virrat ja jännitteet sähkötehon siirto- ja jakelujärjestelmissä
6. Hengen- ja terveydenvaara, omaisuudenvaara ja häiriöt: käsittelee ihmisille ja laitteille aiheutuvaa riskiä antaen tietoa turvallisuusnäkökohdista ja vaaran johtavista tilanteista
7. Suojaavat toimenpiteet ja turvallisuusvarotoimenpiteet: esittelee suojaavia toimenpiteitä erilaisissa vaara- ja häiriötilanteissa
8. Suojaavat laitteet: antaa tietoa erityyppisistä ylijännite- ja ylivirtasuojista sekä suojalaitteista, jotka eivät aiheuta keskeytystä.
9. Testausmenetelmät ja laitteet

## 7.5 VHV-ohjeet

Suurjännitteisistä sähkölaitteistoista aiheutuvien vaara- ja häiriöjännitteiden rajoittamiseksi toimii pysyvä Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta (VHV), jossa ovat olleet edustettuina Elisa, Fingrid, Finnet-liitto, Sonera, Sähköenergialiitto, Turvatekniikan keskus, Viestintävirasto ja VR-Rata. [25] [56]

VHV on laatinut televerkkojen suojausta käsittelevän viisiosaisen ohjesarjan, josta induktiovaarajännitteiden kannalta merkittävimmät ovat neljä ensimmäistä osaa: osa 1: menettely sähkö- ja televerkkojen vaara- ja häiriöjännitetapauksissa, osa 2: induktio, osa 3: häiriöjännitesuojaus sekä osa 4: työskentely suurjännitejohtojen aiheuttamille vaarajännitteille alttiilla telejohdoilla. Valiokunta ei ole ollut aktiivinen viime vuosina. [56]

VHV:n ohjeet on tarkoitettu täydentämään määräyksiä ja standardeja esittämällä Suomen olosuhteisiin sopivat parametriarvot, verkkojen rakenteeseen sopivimmat suunnittelumenetelmät ja suojaustoimenpiteet sekä tarpeelliset työturvallisuuksitoimenpiteet. Eräs täydennettävistä standardeista on ITU-direktiivit. Nykyään tehtävät induktiovaarajänniteselvitykset Suomessa sijaitseville voimajohdoille ovat perustuneet suurelta osin juuri VHV-ohjeeseen 2.

## 7.6 ITU-T K.68

Tämä ITU-T:n julkaisema suositus määrää tilanteet, joissa induktiojännitteet tulisi telejohdoista tarkastaa. Suosituksessa myös ohjeistetaan induktiolaskelmien tekemisessä ja annetaan lukuarvoja erilaisille reduktiokertoimille. Suositus on siis ikään kuin kansainvälinen VHV-ohje. Suosituksessa on myös raja-arvoja vaara- ja häiriöjännitteille. Suomessa tulee kuitenkin näiden suhteen noudattaa Viestintäviraston määräystä 43D/2010M. Ohjeessa annetaan myös ohjeita yleisesti eri vaarajännitelaskelmia varten. Koska VHV ei ole ollut aktiivinen viime aikoina, tulevaisuudessa induktiovaarajänniteselvitysten tekeminen voisi perustua suositukseen K.68. Suosituksen saa ladattua ilmaiseksi ITU-T:n Internet-sivuilta. [24]

## 7.7 Eri osapuolten välisistä suhteista

Tarkasteltaessa induktiovaarajännitteitä tarvitaan saumatonta yhteistyötä eri osapuolten välillä. Induktiovaarajänniteselvityksen laatijan on otettava yhteyttä ensinnäkin voimajohdon haltijaan tai kantaverkkoyhtiöön saadakseen voimajohdon maasulkuvirtatiedot. Toisekseen selvityksen laatija tarvitsee tiedot tele- tai maakaasuputkiverkon sijainnista ja rakenteesta tarkasteltavalta alueelta.

Sähköturvallisuuslakia sovelletaan sen toisen pykälän mukaan laitteisiin ja laitteistoihin, joita käytetään sähköön tuottamisessa, siirrossa, jakelussa tai käytössä ja joiden sähkömagneettisista ominaisuuksista voi aiheutua vahingon vaaraa tai häiriötä. Kolmannessa momentissa sanotaan lakia sovellettavan televerkkoihin, telepäätelaitteisiin ja radiolaitteisiin siltä osin kuin niistä voi aiheutua vaaraa hengelle, terveydelle tai omaisuudelle sekä sellaisiin niistä aiheutuviin häiriöihin, joista ei säädetä teletoimintalaissa

(183/87) eikä radiolaissa (517/88). Edelleen lain 5§:ssä säädetään, että sähkölaitteet on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä niin, että niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä sekä niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti. [57]

Sähköturvallisuuslain 47 §:ssä mainitaan seuraavasti:

*”Jos sähkölaitteisto aiheuttaa häiriötä tai vaaraa toiselle sähkölaitteistolle tai sen käytölle taikka aiheuttaa sen välityksellä häiriötä tai vaaraa, vaikka molemmat laitteistot ovat 5 §:n ja 5 a luvun säännösten tai 6 §:n nojalla annettujen määräysten ja hyvän teknisen tavan mukaisia, myöhemmin rakennetun laitteiston omistajan tulee, jollei 2 momentista muuta seuraa, suorittaa laitteistossaan häiriön tai vaaran poistamiseksi tarvittavat toimenpiteet.*

*Jos häiriö tai vaara on poistettavissa 1 momentissa tarkoitetuista toimenpiteistä aiheutuvia kustannuksia huomattavasti pienemmin kustannuksin muuttamalla tai täydentämällä aikaisemmin rakennetun laitteiston teknistä rakennetta ja tämä voidaan tehdä aiheuttamatta laitteiston toiminnalle kohtuutonta haittaa, aikaisemmin rakennetun laitteiston omistajan tulee suorittaa tarvittavat muutokset tai täydennykset laitteistossaan.”*[57]

Viestintämarkkina-laissa [58] mainitaan 128 §:ssä, että yleiset viestintäverkot ja viestintäpalvelut sekä niihin liitettävät viestintäverkot ja viestintäpalvelut on suunniteltava, rakennettava ja ylläpidettävä muun muassa siten, että

1. televiestintä on tekniseltä laadultaan hyvää;
2. verkot ja palvelut kestävät normaalit odotettavissa olevat ilmastolliset, mekaaniset, sähkömagneettiset ja muut ulkoiset häiriöt;
3. ne toimivat mahdollisimman luotettavasti myös valmiuslain tarkoittamissa poikkeusoloissa ja normaaliolojen häiriötilanteissa,
4. käyttäjien tai muiden henkilöiden terveydelle tai omaisuudelle ei aiheudu haittaa.

Viestintäviraston määräyksen 43D/2010M perustelumuistiossa [56] on myös maininta sähkölaitteistojen ja viestintäverkon (televerkon) haltijan keskinäisistä suhteista. Sähköturvallisuuslain velvoitteiden ja viestintäverkon suojaamisen yhteensovittaminen on ensisijaisesti sähköturvallisuuslainsäädännön asia. Riittävä tiedonvaihto sähkölaitteiston ja viestintäverkon haltijan välillä ja suojaustoimenpiteiden toteuttaminen tarvittaessa myös viestintäverkossa kuuluvat sähköturvallisuuteen ja ovat välttämätön osa vastuullista viestintäverkon suunnittelua.

ITU-T K.68 mainitaan, että johtuen induktiovaarajännitteiden vaikutuksesta moneen eri tahoon on oikean, tehokkaan, luotettavan ja ajoittaisen tietojen vaihdon tärkeys erittäin tärkeää. Siinä myös sanotaan, että vastuun tulisi perustua ”ensimmäisenä paikalla” -periaatteeseen, ottaen kuitenkin huomioon kansalliset säädökset ja mahdolliset osapuolten väliset sopimukset. Käytännössä tämä tarkoittaa, että vastuu toimenpiteistä on sillä, kuka on viimeisenä paikalle tullut. [24]

## 8 INDUKTIOVAARAJÄNNITESELVITYS

Standardin SFS-EN 50341-1 mukaan voimajohdot eivät saa aiheuttaa vaarallisia tai vain häiritseviä induktiovaikutuksia voimajohdon läheisyydessä oleviin pitkiin metallisiin rakenteisiin. Tämän vaatimuksen takia tulee voimajohtokohtaisesti tutkia, aiheuttavatko voimajohdot tällaisia vaikutuksia. Tutkimustyöstä tehdään selvitys, jota kutsutaan induktiovaarajänniteselvitykseksi. Standardin mukaan selvityksessä olevien laskelmien ja häiriövaikutusten poistamiseksi tarvittavien toimenpiteiden on perustuttava asiaa koskeviin kansainvälisiin ja kansallisiin standardeihin ja/tai yleisesti hyväksyttyihin käytännön menettelyohjeisiin ja/tai erityisiin osapuolten välisiin sopimuksiin.

Induktiovaarajänniteselvitys on perustunut pitkään Vaara- ja häiriöjännitevaliokunnan ohjeisiin, erityisesti osaan 2. Ohjeet ovat kuitenkin jo kahdenkymmenen vuoden takaa, eikä valiokunta ole viime aikoina ollut aktiivinen. Tulevaisuudessa vaarajänniteselvitys voisi soveltuvien osin perustua ITU-T:n suositukseen K.68, joka määrittelee tarvittavan laskentatarpeen eri tilanteissa.

Aiemmin mainitun standardin osassa SFS-EN 50341-3-7 ”Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt” luvun 5.4.5.4 kohdassa FI.6 viitataan Viestintäviraston määräykseen viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta 43D/2010M sekä standardiin SFS 5717. Määräys ja standardi antavat Suomessa käytettävät raja-arvot indusoituneille jännitteille telejohdoissa ja pitkissä putkissa. Induktiovaarajänniteselvityksessä sovelletaan tätä määräystä ja standardia sekä tutkitaan, ettei voimajohdon induktiovaikutus ylitä näiden asettamia raja-arvoja. Myös nämä liittyvät siis oleellisesti induktiovaarajänniteselvitykseen.

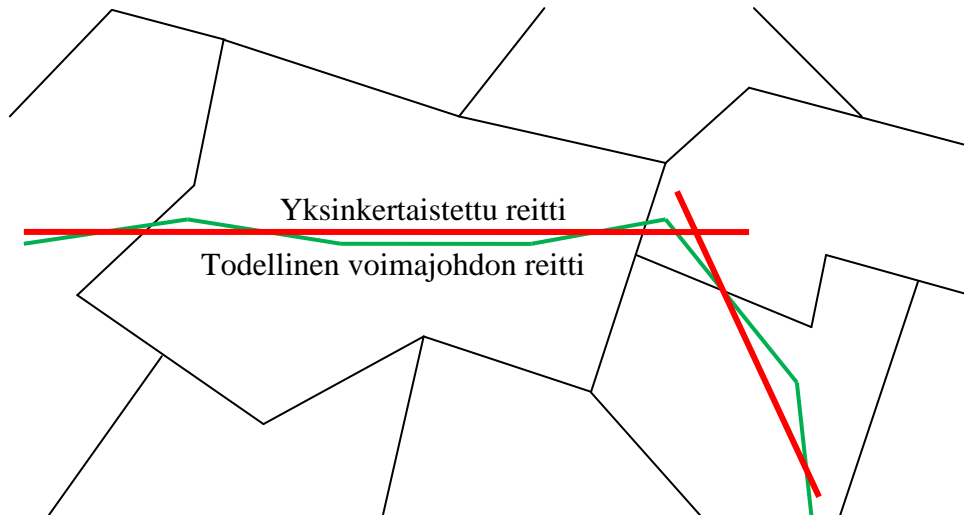
### 8.1 Selvitystyön eteneminen

Induktiovaarajänniteselvitystyön tekeminen lähtee liikkeelle tiedon keruusta. Tarkastelun kannalta rajoittavin tilanne on yksivaiheinen maasulku. Tätä varten tulee olla yhteydessä Fingridiin ja johdon omistajaan maasulkuvirtatietojen ja laukaisuaikojen selvittämiseksi. Tarkasteltavan johdon alueelta tarvitaan tiedot alueen telejohdoista sekä myös tiedot keskitinalueista ja keskittimien sijainneista. Näitä tiedustellaan paikallisilta operaattoreilta sekä muilta tahoilta, jotka omistavat alueella telejohtoja. Näitä voivat olla esimerkiksi kilpailevat operaattorit ja puolustusvoimat. Myös mahdollisten kaasuputkien ja muiden pitkien johtavien rakenteiden sijainnit on selvitettävä.

Tarvittavat televerkkotiedot pyydetään sopivassa mittakaavassa olevalle tietokoneella avattavalle karttapohjalle. Tiedot tarvitaan voimajohdosta tietyn etäisyyden sisäpuolella olevasta televerkosta. Etäisyyden arvioinnissa suunnittelija arvioi vaikutusalueen asutuksen (mahdollinen taajama) ja vikavirtatietojen perusteella. Maksimietäisyytenä

voidaan pitää 10 kilometriä. Jos tiedon saannissa ilmenee vastahakoisuutta, voidaan tietojen tarvetta perustella kappaleen 7.7 mukaisin perusteluin. Televerkon sijaintia voidaan myös arvioida paikallisen tiestön ja asutuksen perusteella, sillä telejohdot sijaitsevat usein teiden varsilla.

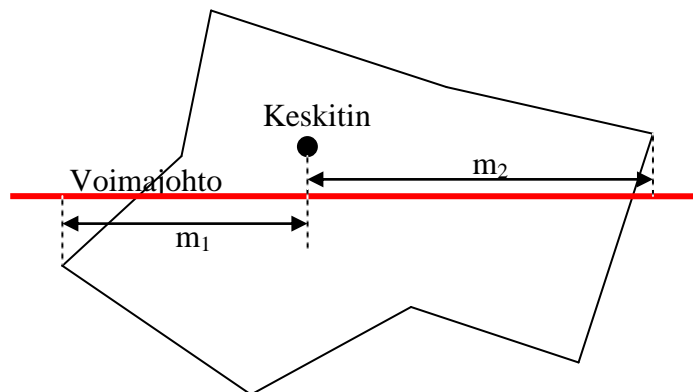
Saadulle karttapohjalle piirretään kuvan 8.1 mukaisesti tarkasteltava voimajohto sopivasti yksinkertaistaen siten, ettei jokaista mutkaa tarvitse ottaa huomioon.



**Kuva 8.1.** Voimajohdon reitin yksinkertaistaminen keskitinaluekartalla.

Yksinkertaistus voidaan tässä vaiheessa tehdä, mutta mikäli raja-arvot ovat lähellä ylitymistä, otetaan voimajohdon reitti tarkemmin huomioon. Nyt tilannetta voidaan tarkastella erikseen jokaisen voimajohdon alle jäävän ja lähistöllä olevan keskitinalueen suhteen.

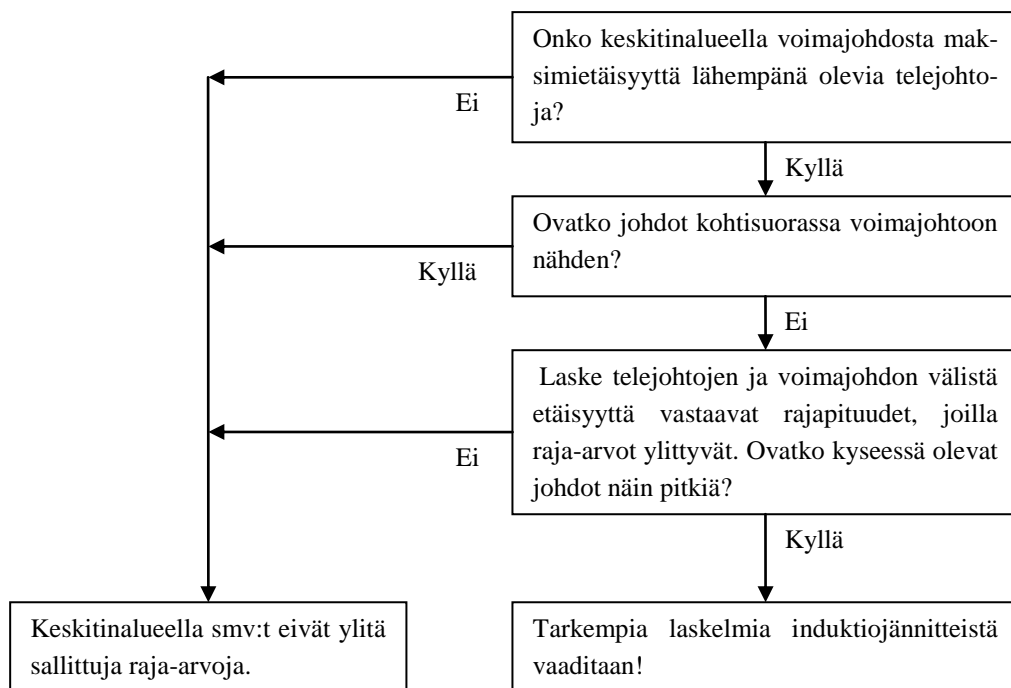
Keskitinaluekohtaisessa tarkastelussa voidaan käyttää tiettyjä karsintamenetelmiä tarvittavien laskelmien vähentämiseksi. Keskitinalueelle lasketaan voimajohdon suuntaiset maksimiprojektiot, jotka kuvaavat sitä, kuinka pitkiä telejohtoja alueella teoriassa voi sijaita. Koska telejohdot alkavat aina keskittimeltä ja päättyvät keskitinaluerajojen sisäpuolelle, saadaan keskitinalueelle maksimiprojektio voimajohdon kumpaankin suuntaan (Kuva 8.2). Tarkasteluihin valitaan yleensä projektioista suurempi.



**Kuva 8.2.** Maksimiprojektion määrittäminen. Kuvassa maksimiprojektio  $m_2 > m_1$ .



Tarkasteltavan keskitinalueen indusoivana vikavirtana käytetään kuvien 3.3 ja 3.4 mukaisesti valittuja virta-arvoja. Kuvissa telejohdon paikalle voidaan ajatella keskitinalue. Saadut virta-arvot tulee kertoa vähintäänkin voimajohdon ukkosjohtimien sekä myös mahdollisella taajamasta tai rautatiestä aiheutuvalla reduktiokertoimella. Tarkemmassa laskennassa voidaan käyttää myös muita reduktiokertoimia. Kun tiedossa on reduktiokertoimella kerrottu vikavirta, maksimiprojektion pituus sekä johdon laukaisu-aikaa vastaava rajajännite, voidaan yhtälöstä (5) ratkaista keskinäisimpedanssi ja sitä vastaava voimajohdon ja telejohdon välinen maksimietäisyys. Maksimietäisyys on siis se etäisyys, jolla maksimiprojektion pituisen telejohdon tulisi sijaita, jotta rajajännite ylittyisi. Koska maksimiprojektiota pidempiä voimajohdon kanssa yhdensuuntaisia telejohtoja ei voi olla, rajaa tämä laskentatarpeen ainoastaan voimajohdosta kyseistä maksimietäisyyttä lähempänä sijaitseviin telejohtoihin. Nyt keskitinaluetta voidaan tarkastella kaavion 8.1 mukaisesti. Kaavio on tietyssä määrin vain suuntaa antava, sillä todellisuudessa tarkastus ei ole näin yksiselitteistä. Kaavion mukainen tarkastus voi vaikuttaa myös hankalalta, mutta yhtälön (5) avulla voidaan muodostaa laskentataulukko, josta nähdään helposti eri etäisyydellä voimajohdosta olevat telejohtojen rajapituudet. Tällaisen taulukon avulla tarkastus on helppoa.



**Kaavio 8.1.** Vuokaavio induktiojännitteiden tarkastamisesta ja laskentatarpeesta keskitinalueella.

Kaavion mukainen maksimietäisyyden käyttö tarkastuksessa on hyödyllistä, koska sen avulla saadaan rajattua tarkempi laskenta vain tietyille telejohdoille. Tarkasteltaessa voimajohdosta kauempana olevia keskitinalueita käy usein siten, että koko keskitinalue sijoittuu maksimietäisyyttä kauemmas voimajohdosta. Tällöin voidaan välittömästi todeta, ettei induktio aiheuta siellä ongelmia.

Koska kaavion käyttö ei aina ole näin yksiselitteistä, voidaan joskus joutua korvaamaan telejohtoja osittain porrassviivoilla, jolloin kokonais-smv saadaan eri etäisyydellä oleviin porrassviivoihin indusoituneiden smv:n summana. Voimajohdon tehdessä mutkan keskitinalueella, joudutaan laskemaan kertynyt smv tai maksimiprojektio tietyltä osuudelta kahteen kertaan (Kuva 5.7).

Kaavion 8.1 ”*Tarkempia laskelmia vaaditaan!*”-kohta tarkoittaa sitä, että voimajohdot ja haluttu telejohto mallinnetaan tietokoneohjelmalle. Malliin syötetään myös maadoituskohdat maadoitusresistansseineen ja käytettävät telejohdot reduktiokertoimineen. Tällöin ohjelma laskee johtoon kertyvän smv:n ja maadoituksissa näkyvät maadoitusjännitteet. Näitä voidaan verrata sitten Viestintäviraston määräyksiin ja todeta, ettei ongelmia synny tai ryhtyä parantamaan maadoituksia ja lisäämään suojausta raja-arvojen alapuolelle pääsemiseksi. Käytännössä tarkempi laskenta ottaa siis huomioon telejohdon maadoitukset ja reduktiokertoimen sekä tarkemman keskinäisimpedanssin.

Keskitinaluetarkastelun jälkeen tarkastellaan keskittimien väliset yhdysjohdot. Usein voidaan olettaa näiden olevan valokaapeleita, joten tarkempia laskelmia ei vaadita. Mikäli kuitenkin tiedetään yhdysjohdon olevan kuparia, lasketaan siihen indusoituva smv normaalisti kaavan (5) mukaan.

Selvityksessä arvioidaan myös normaalikäytössä indusoituvaa smv:aa. Sitä voidaan arvioida kappaleessa 3.2.1 esitetyn yhtälön (4) avulla. Normaalikäytön aikaisten jännitteiden tarkka laskenta on kuitenkin hyvin vaikeaa riippuen vaihtelevasta kuormitusvirrasta sekä voimajohdon ja telejohdon välisestä etäisyydestä.

Induktiovaarajänniteselvityksessä käsitellään vielä mahdolliset kaasuputket tai muut pitkät johtavat rakenteet. Näille esitetään selvityksessä vaadittavat toimenpiteet, mikäli induktion katsotaan muodostavan niissä ongelmia. Käytännössä toimenpiteenä on maadoittaminen.

Selvityksen lopussa esitetään johtopäätökset. Selvityksessä on tutkittu voimajohdon normaalikäytön ja maasulun aikaisia induktiovaikutuksia, joiden joko todetaan olevan raja-arvojen ala- tai yläpuolella. Jos jossain kohteessa raja-arvot ylittäviä induktiovaikutuksia esiintyy, esitetään näille kohteille toimenpide-ehdotukset tilanteen korjaamiseksi.

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Induktiovaarajännitteet ovat yksi voimajohtojen muodostamista vaarajännitteistä, jonka kytkeytymismuotona on sähkömagneettinen induktio. Muiden vaarajännitteiden kytkeytymistavat ovat konduktiivinen ja kapasitiivinen. Induktio on yleisin ja laajimmalle alueelle levittäytyvä vaarajännite. Induktio aiheuttaa pitkittäisen sähkömotorisen voiman voimajohdon kanssa yhdensuuntaisiin johtaviin rakenteisiin, kuten telejohtoihin ja maakaasuputkiin. Indusoitumista tapahtuu niin normaalikäytössä kuin vikatilanteissakin, joista yksivaiheinen maasulku on pahin.

Suomessa induktiovaarajännitteet aiheuttavat ongelmia lähinnä siirtoverkoissa. Maasta erotetuissa keskijänniteverkoissa induktio aiheuttaa harvoin haitallisia vaikutuksia. Suomen siirtoverkkojen ongelmat johtuvat Suomen maanperän rakenteesta. Suomessa kallio on hyvin lähellä maanpintaa, minkä johdosta keskimääräinen maan ominaisresistivisyys on huomattavan suuri  $2300 \Omega\text{m}$  verrattuna esimerkiksi Keski-Euroopan noin  $50 \Omega\text{m}$ . Tästä syystä maasulun maassa palaava virta kulkee noin 4,5 km syvyydessä aiheuttaen hyvin laajan indusoivan virtasilmukan, jonka magneettikenttä ulottuu kymmenien kilometrien päähän. Suomen siirtoverkkojen maadoitustavan valinnan myötä maasulkuvirrat ovat hyvin suuria, joka osaltaan vaikuttaa syntyviin vaarajännitteisiin.

Voimajohdon induktio riippuu voimajohdon käyttötilasta. Normaalikäytössä indusoituvat jännitteet ovat huomattavasti pienempiä ja ne myös rajoittuvat huomattavasti pienemmille etäisyyksille voimajohdosta kuin maasulun aikaiset jännitteet. Maasulun induktiovaikutus riippuu indusoivan virran lisäksi kohteiden välisestä keskinäisimpedanssista. Keskinäisimpedanssin suuruuteen vaikuttavat kohteiden välinen etäisyys, maan ominaisresistivisyys ja indusoivan virran taajuus. Keskinäisimpedanssi voidaan helposti laskea likiarvoyhtälöistä tai katsoa kuvaajista.

Maasulun aikaisesta vikavirrasta vain osa aiheuttaa vaarallista induktiota. Voimajohdossa kulkeva maasulkuvirta indusoi voimajohdon ukkosjohtimiin virran, joka palaa vikavirtaa syöttävälle asemalle. Tällöin vain ukkosjohtimien reduktiokertoimella kerrottu osa maasulkuvirrasta kulkeutuu maahan ja aiheuttaa laajalle ulottuvan magneettikentän. Edelleen osa tästä maavirrasta saattaa kulkeutua maassa olevia johtavia rakenteita pitkin. Näiden vaikutusta kuvataan taajama- ja rautatiereduktiokertoimella. Myös muita reduktiota aiheuttavia tekijöitä on. Indusoiaksi virraksi jää siis näiden reduktiokertoimien tulolla kerrottu maasulkuvirta. Indusoiavaa virtaa pienentää edelleen lähellä maasulkupaikkaa maavirran jakaantuminen ukkosjohtimien ja pylväismaadoitusten muodostaman maadoitusimpedanssiketjun mukaisesti. Se voidaan ottaa huomioon valitsemalla maasulkuvirran arvo laskelmiin epäsymmetriavirtapiirroksista 5 kilometriä ohi maasul-

kupaikan. Tätä voidaan käyttää kuitenkin vain Suomessa. Muissa maissa vastaava arvo on laskettava paikallisella maan ominaisresisttiivisyydellä. Tällaisen 5 kilometrin arvon käyttäminen tarkasteluissa on jossain määrin kyseenalaista monista siihen vaikuttavista tekijöistä johtuen, kuten pylväsmaadoitusresistansseista, jotka vaihtelevat pylväskohtaisesti hyvin paljon.

Voimajohtojen aiheuttamat jännitteet aiheuttavat ongelmia lähinnä televerkossa ja kaasun siirtoputkissa. Televerkko on toistaiseksi Suomessa vielä hyvin suurelta osin kuparikaapelia, johon induktio vaikuttaa. Verkko on rakennettu tähtimäiseksi, jossa jokaisen tilaajat liitetään omalla johdollaan keskitinalueella sijaitsevaan keskittimeen. Selvitys induktiovaarajännitteistä voidaan tehdä keskitinaluekohtaisesti, koska keskitinalueen rajat määrittävät pitkälti telejohtojen maksimipituudet. Kaasuputkissa ongelman aiheuttaa pääasiassa metalliset siirtoverkon putket. Laskentatarvetta voidaan selvitystyössä vähentää maksimiprojektion ja rajapituuksien avulla.

Valokaapelit eivät aiheuta toimenpiteitä, jos niissä ei ole johtavaa vaippaa. Mikäli sellainen kuitenkin on, täytyy sen maadoittamisesta pitää huolta. Tällaisella johdolla, kuten myös muilla induktiolle alttiilla johdoilla, tulee työturvallisuuteen kiinnittää erityistä huomiota.

Televerkossa keskittimien väliset yhdysjohdot ovat suurelta osin valokaapelia. Joi-tain yksittäisiä yhdysjohtoja on vielä kuparista. Tämän hetken trendinä on saada kupari pois pikkuhiljaa myös tilaajaverkosta, jossa uudet yhteydet usein rakennetaan jo valokaapelilla. Myös vanhoja kupariyhteyksiä saneerataan valokuituyhteyksiksi, vaikkakin myös kuparia käytetään. On kuitenkin odotettavissa, että muutaman kymmenen vuoden kuluessa tiedonsiirtotarpeet ovat pakottaneet kuparin kokonaan pois televerkosta. Tällöin televerkkoon indusoituneiden jännitteiden selvitystyö tulee muuttumaan jonkin verran.

Induktiovaarajännitteiden vaikutukset voidaan jakaa kolmeen luokkaan. Vaarallisia jännitteet ovat työhenkilöstölle tai maallikoille, jotka työskentelevät vaarajännitteelle alttiissa laitteistossa tai pääsevät koskettamaan jännitteelle altista osaa. Vaaralliseksi vaikutuksen voi luokitella, jos se aiheuttaa hengenvaaran suoraan tai välillisesti. Haitallisia vaikutuksia ovat laitteiden pysyvät rikkoutumiset ja pysyvästi toimintaa heikentävät vaikutukset. Sen sijaan häiriöt ovat sellaisia, jotka ilmenevät esimerkiksi telelaitteistossa, mutta eivät aiheuta rikkoutumista. Häiriöt myös poistuvat induktiovaikutuksen vaimennuttua esimerkiksi kuormitusvirran pienennyttyä tai maasulun poiskytkettyä.

Induktiojännitteitä voidaan ehkäistä monella eri tavalla. Käytännössä paras tapa on reduktion hyödyntäminen. Reduktio on tavallaan itsessään jo indusoitumisen yksi ilmenemismuoto ja sitä käytetään hyväksi monessa induktion ehkäisemiseen tarkoitettussa laitteessa. Ukkosjohtimien lisääminen ja niiden johtavuuden parantaminen pienentävät maassa kulkevan maavirran suuruutta ja näin ollen myös induktion voimakkuutta. Jos rajajännitteet ylittyvät jossain kohteessa, paras ja halvin tapa lienee lisätä ja parantaa maadoituksia sekä ylijännitesuojia. Myös erilaisia laitteistoja saattaa markkinoilta löytyä, mutta niiden käyttö voi olla kallista ja monimutkaista. Televerkossa voidaan operaattoreiden kanssa keskustella myös kupariyhteyksien korvaamisesta valokuidulla.

Työssä on kerrottu erilaisista standardeista ja ohjeista, jossa annetaan tietoja ja ohjeita induktiovaarajännitteistä. Työn aikana näihin perehtyneenä ehdottaisin, että tulevaisuudessa induktiovaarajänniteselvitys pohjautuisi suurelta osalta suositukseen ITU-T K.68 VHV-ohjeen sijaan. Raja-arvot indusoituneelle smv:lle ja sen aiheuttamille maadoitusjännitteille tulee katsoa standardin SFS-EN 50341-3-7 mukaisesti Viestintäministeriön määräyksestä 43D/2010M kuten ennenkin.

## LÄHTEET

- [1] Elovaara, J., Laiho, Y. 1999. Sähkölaitostekniikan perusteet. 4. painos. Helsinki, Otatieto.
- [2] Cigre, working group 36.02. 1995. Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines. Paris.
- [3] ITU-T. 2008. *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines: Danger, damage and disturbance.* (Volume VI). Geneva, ITU.
- [4] ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja. 9. painos. Päivitetty 7/2000. [WWW]. [Viitattu 22.9.2010]. Saatavissa: <http://heikki.pp.fi/abb/>.
- [5] Fingrid Oyj. 2011. Sähköpostivastaus Ulla Huhtaselta tiedusteluihini verkon kuormitus- ja maasulkuvirroista. Ulla.Huhtanen@fingrid.fi. 24.2.2011
- [6] Sähkömarkkinavirasto. 2010. Sähköverkon tunnusluvut vuodelta 2009. [WWW]. [Viitattu: 1.12.2010]. Saatavissa: [http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Sahkoverkko\\_ttluvut\\_2009.xlsx](http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Sahkoverkko_ttluvut_2009.xlsx)
- [7] Lakervi, E., Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki, Otatieto.
- [8] SFS-EN 50341-1. 2002. Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [9] ANSI/IEEE Std 81. 1983. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- [10] ITU-T. 1999. *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines: Calculating induced voltages and currents in practical cases.* (Volume II). Geneva, ITU.
- [11] Saraoja, E. K. 1946. Maa- ja kallioperän ominaisvastus Suomessa ja voimajohtojen vaikutus viestivojohtoihin. Väitöskirja. Helsinki, Sanoma Oy.
- [12] SFS 6001 + A1 + A2. 2009. Suurjännitesähköasennukset. 3. painos. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [13] J. Elovaara, L. Haarla. 2011. Sähköverkot 2: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. 1. painos. Helsinki, Otatieto.
- [14] Bastman, J. Kevät 2010. Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi -kurssi ja luentomoniste. Tampere, TTY.
- [15] J. Elovaara, L. Haarla. 2011. Sähköverkot 1: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. 1. painos. Helsinki, Otatieto.
- [16] Pesonen, A. J., Maaskola, J., Elovaara, J. 1985. Special Features of Earth-fault Currents. Paris, Cigre.

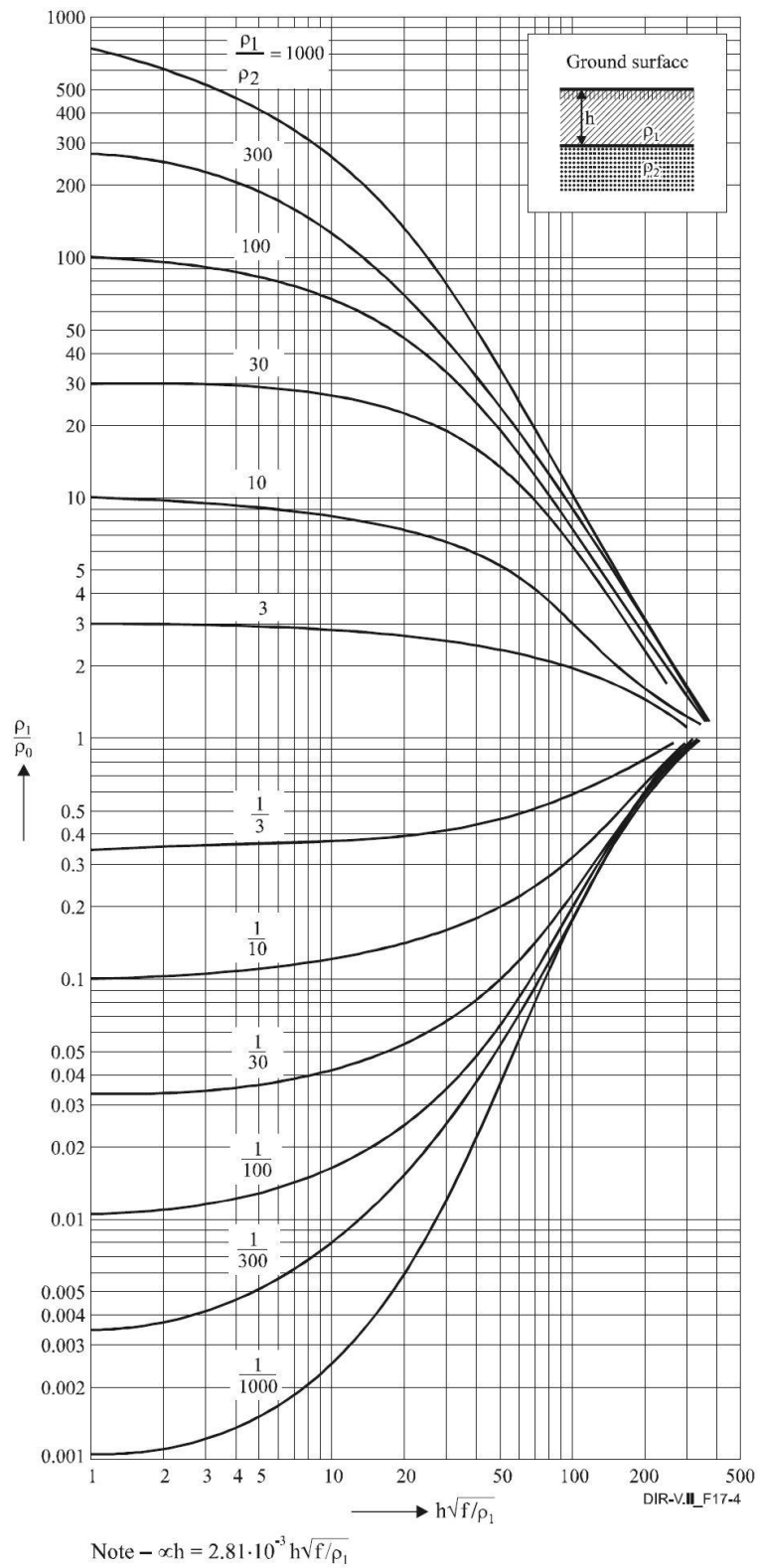
- [17] Pesonen, A. J. Maavirtailmiöt. Sähkölaitostekniikan lisensiaattiseminaari syksy 1988 – kevät 1989. Teknillinen korkeakoulu: sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratorio.
- [18] Pesonen, A. J. 1978. Puhelinjohtojen induktiojännitesuojaus. Imatran Voima Osakeyhtiö. Sähköosasto.
- [19] Pesonen, A. J. 1968. Suurjännitejohtojen aiheuttamat induktiovaarajännitteet. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, julkaisu 10–68, suojauskysymykset, osa A. Helsinki.
- [20] Tleis, N. D. 2008. Power Systems Modelling and Fault Analysis – Theory and Practice. Newnes (Elsevier).
- [21] ITU-T. 2008. *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines: Inducing currents and voltages in power transmission and distribution systems.* (Volume V). Geneva, ITU.
- [22] Pesonen, A. J. 1968. Puhelinlaitteiden suojaus erilaisilta vaarajännitteiltä. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, julkaisu 10–68, suojauskysymykset, osa B. Helsinki.
- [23] Viestintävirasto 43D/2010M. 2004. Määräys viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta. Helsinki
- [24] ITU-T. 2008. Recommendation ITU-T K.68: Operator responsibilities in the management of electromagnetic interference by power systems on telecommunication systems. Geneva, ITU.
- [25] Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. 1991. VHV-ohje 02: Vaarajännitesuojaus: Induktio.
- [26] Luukko, P. 1968. Induktiojännitesuojaussuunnitelman laatiminen käytännössä. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, julkaisu 10–68, suojauskysymykset, osa A. Helsinki.
- [27] Pesonen, A. J. Ukkosjohtimet, pylväsmadoitukset ja vaarajännitteet. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, julkaisu 92–76. Helsinki
- [28] Alatalo, P. 1966. Kaapelien reduktiokertoimet. Eripainos Sähkö-lehdestä 2/1966. Suomen Kaapelitehdas Osakeyhtiö, Helsinki.
- [29] Toisen käden lähde lähteestä [28]. Feist, K. H. Über den Reduktionsfaktor von Starkstromkabeln. Siemens-Zeitschrift 39 (1965), n:o 1, s. 61 – 67.
- [30] Tilastokeskus. Käsitteet ja määritelmät. [WWW]. [Viitattu:13.1.2011]. Saatavissa: <http://www.stat.fi/meta/kas/taajama.html>
- [31] Åhlberg, R. 1966. Voimajohtojen vaara- ja häiriövaikutus puhelinjohtoihin ja -laitteisiin. Julkaisu 6–66.

- [32] S. J. Halme. 1992. Televiestintäjärjestelmät. 6. korjattu painos. Helsinki, Otatie-to
- [33] V. Volotinen. 1991. Tietoliikenne: Verkot ja päätelaitteet. Porvoo, WSOY.
- [34] Kuitu.net. Optisen tiedon siirron historiaa. [WWW]. [Viitattu:3.3.2011]. Saatavissa: [http://www.kuitu.net/portal/fi/kuituinfo/optinen\\_liityntaverkko/historiaa](http://www.kuitu.net/portal/fi/kuituinfo/optinen_liityntaverkko/historiaa)
- [35] Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 20/2003. Valokaapeli Suomen runko- ja alueverkoissa 2002. Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki.
- [36] O. Alhava, J. Harju. 2010. TLT-2100 Tietoliikenneverkkojen perusteet. Luentomoniste. Versio 1.1. Tietoliikennetekniikan laitos, TTY.
- [37] Haastattelu 21.2.2011. Jaakko Saarenpää, tiimipäällikkö. Eltel Networks Oy, televerkot ylläpito. Tampere.
- [38] SFS 5719. 1991. Televerkon maadoittimet. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [39] Draka. 2011. Kupariset televerkon kaapelit. [WWW]. [Viitattu:10.1.2011]. Saatavissa:  
[http://www.draka.fi/draka/Countries/Draka\\_Finland/Languages/suomi/navigation/Tuotteet/Tietoliikenneverkot/Kuparitelekaapelit/Kupariset\\_televerkon\\_kaapelit/index.jsp](http://www.draka.fi/draka/Countries/Draka_Finland/Languages/suomi/navigation/Tuotteet/Tietoliikenneverkot/Kuparitelekaapelit/Kupariset_televerkon_kaapelit/index.jsp)
- [40] ITU-T. 1990. *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines: Protective measures and safety precautions*. (Volume VII). Geneva, ITU.
- [41] SFS 5717. 1992. Maakaasun siirtoputkiston sijoittaminen suurjännitejohdon tai -kytkinlaitoksen läheisyyteen. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [42] Gasum Oy. Maakaasun siirtoverkosto. [WWW]. [Viitattu:17.2.2011]. Saatavissa: <http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/siirto/Sivut/default.aspx>
- [43] Lainsäädäntö. Valtioneuvoston asetus maakaasun käsittelyn turvallisuudesta 551/2009.
- [44] Gasum Oy. 30.11.2007. Ympäristöselvitys: maakaasuputki Mäntsälä–Siuntio. MPCP Neste Jacobs Oy.
- [45] Tiehallinto. 17.12.2009. Maakaasuputket ja maantiet. Verkkojulkaisu pdf. Saatavissa: [http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100064-v-maakaasuputket\\_ja\\_maantiet.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100064-v-maakaasuputket_ja_maantiet.pdf)
- [46] Valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelu. Gasum Oy:n kaasuputkihanke Mäntsälä–Naantali. [WWW]. [Viitattu:17.2.2011]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=43579>
- [47] Gasum Oy. Maakaasun jakeluputkisto. [WWW]. [Viitattu:17.2.2011]. Saatavissa: <http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/paikallisjakelu/Sivut/default.aspx>



- [48] Suomen kaasuyhdistys. Kaasutilastot. [WWW]. [Viitattu:17.2.2011]. Saatavissa: <http://maakaasu.fi/sisalto/kaasutilastot>
- [49] P. K. Dwivedi, N. S. Saxena, P. Kumar, N. K. Jain. Safety Procedures for Working on De-Energized EHV Lines Sharing Common Right of Way. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992.
- [50] K. Hänninen. 1984. Sähköaitaus voimajohdon läheisyydessä. Voimajohto-osasto, Imatran Voima Oy.
- [51] Yksityinen tiedonanto. Jarmo Kuusinen, suunnittelupäällikkö. Eltel Networks Oy, voimansiirto. Espoo.
- [52] Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. 1991. VHV-ohje 03: Häiriöjännitesuojaus. Äänitaajuushäiriöt.
- [53] C. Englund. 1980. Ylijännitesuojat. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, julkaisu 20–80, luku 7. Helsinki.
- [54] Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. 1991. VHV-ohje 04: Työskentely suurjännitejohtojen aiheuttamille vaarajännitteille alttiilla johdolla.
- [55] SFS-EN 50341-3-7. 2010. Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä Osa 3–7: Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
- [56] Viestintävirasto MPS 43. 2010. Määräyksen 43 perustelut ja soveltaminen viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta. Helsinki.
- [57] Lainsäädäntö. Sähköturvallisuuslaki 410/1996.
- [58] Lainsäädäntö. Viestintämarkkinalaki 393/2003.
- [59] Gasum Oy. Suomen maakaasuverkosto. [WWW]. [Viitattu:17.2.2011]. Saatavissa: [http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/verkostokartat/PublishingImages/2009-10\\_Suomen\\_maakaasuverkosto.jpg](http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/verkostokartat/PublishingImages/2009-10_Suomen_maakaasuverkosto.jpg)

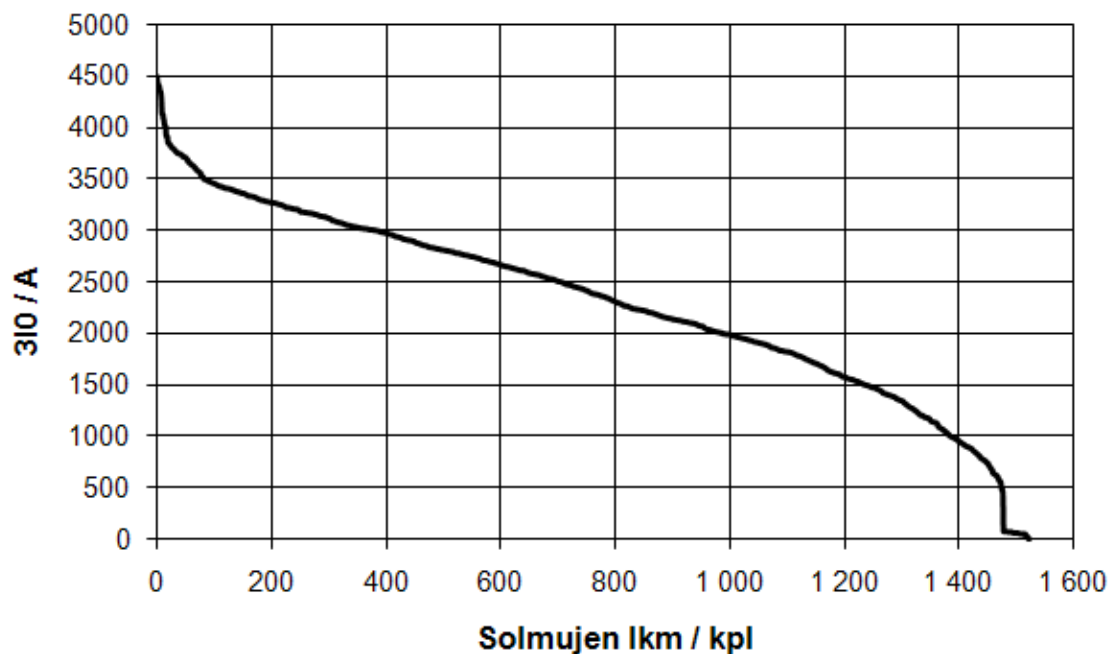
# LIITE 1: MAAN OMINAISRESISTIIVISYYS



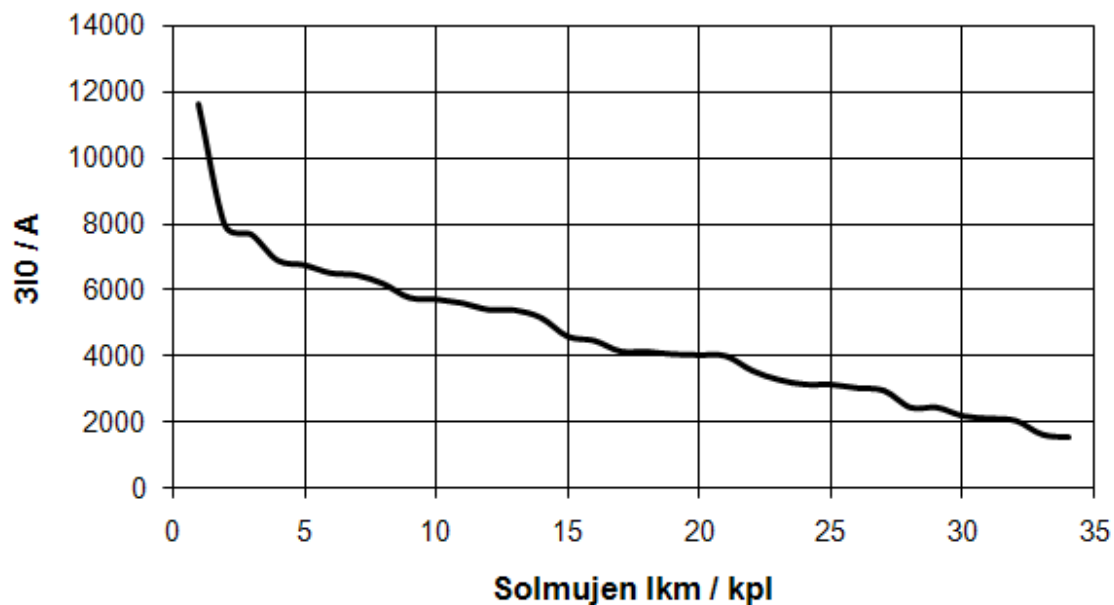
Lähde: [10]. Kuvassa  $\rho_0$  on ekvivalenttinen maaperän resistiivisyys.

## LIITE 2: PYSYVYYSKÄYRÄT SUOMEN YKSIVAIHEISISTA MAA-SULKUVIRROISTA

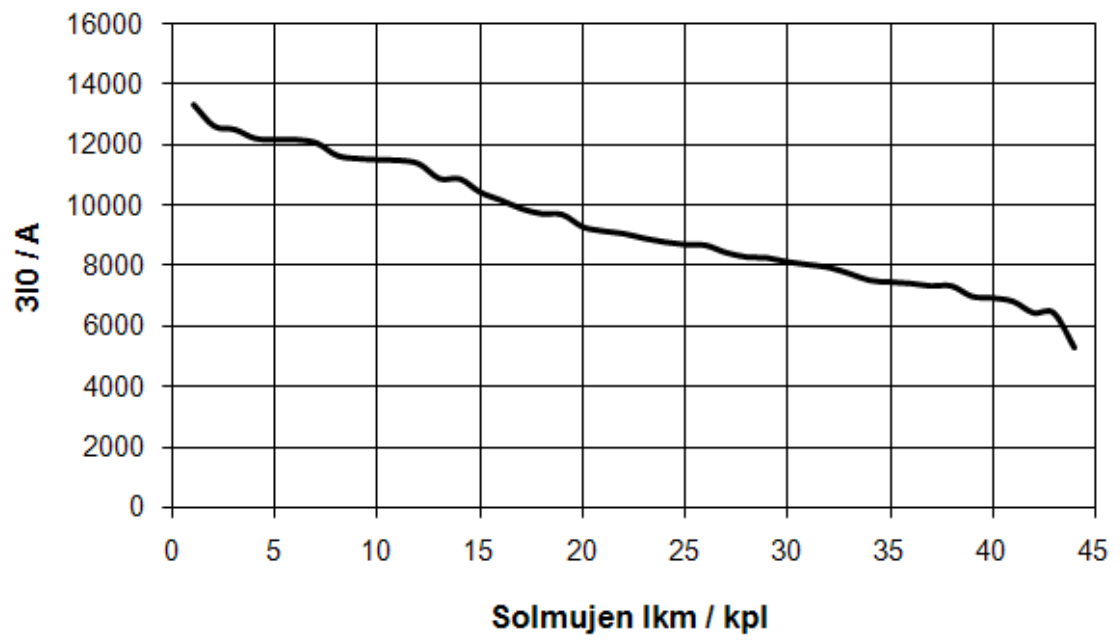
**110 kV verkon yksivaiheiset maasulkuvirrat v.2011**



**220 kV verkon yksivaiheiset maasulkuvirrat v.2011**



### 400 kV verkon yksivaiheiset maasulkuvirrat v.2011



Lähde: [5]

### LIITE 3: PYLVÄSTYYPPEJÄ

a)



b)

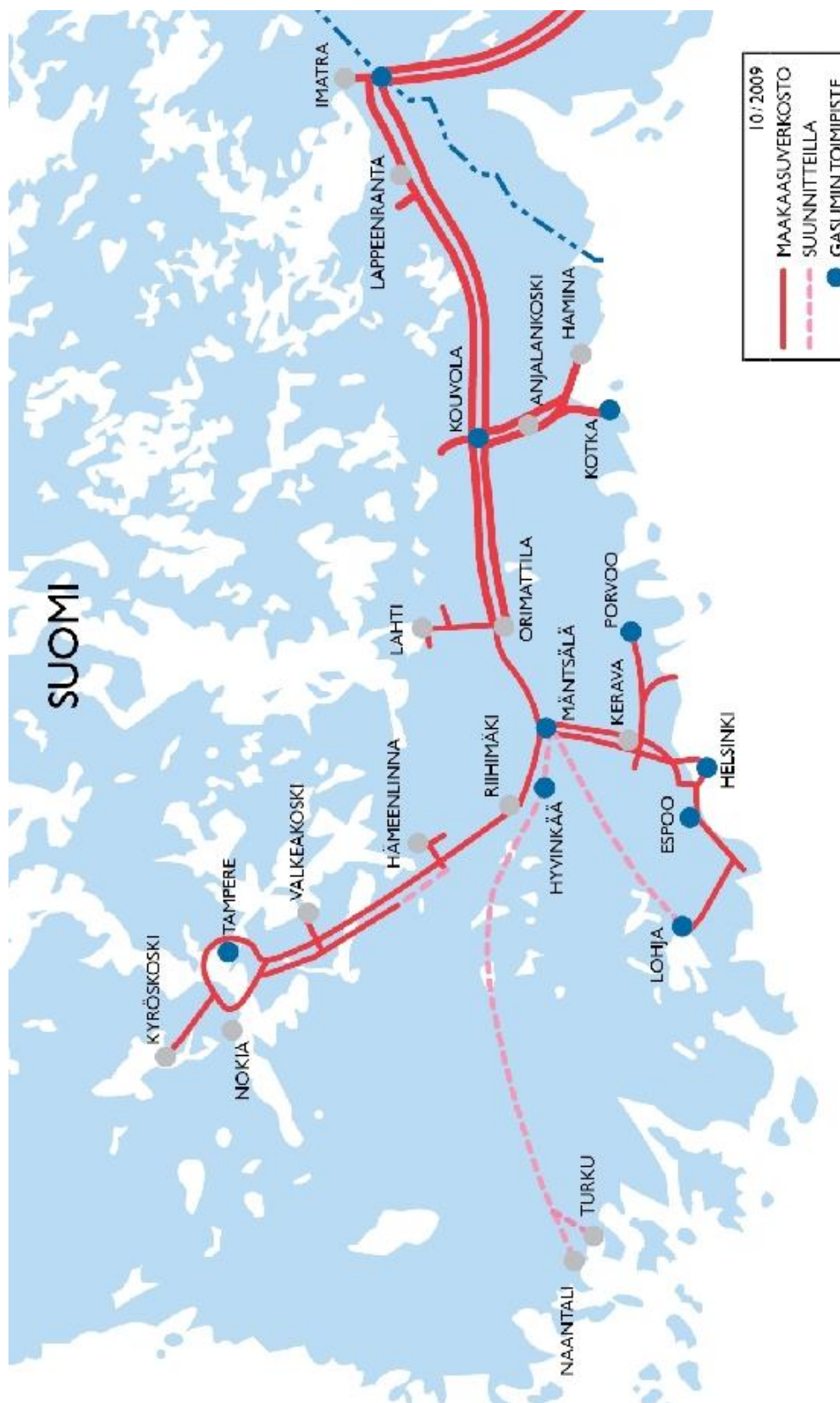


c)



a: Donau, b: Tannenbaum, c: Porttaali

## LIITE 4: SUOMEN KAASUNSIIRTOVERKKKO



Lähde: [59]